

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Mirko Ivačić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Mirko Ivačić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Doc. dr. sc. Goranu Krajačiću na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada.

Mirko Ivačić

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mirko Ivačić

Mat. br.: 0035191306

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza integracije električne energije iz obnovljivih izvora u energetske sustav otoka Mljeta usporedbom EnergyPLAN i NEPLAN alata za energetske planiranje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of integration of electricity from renewable energy sources into energy system of the island of Mljet by comparison of EnergyPLAN and NEPLAN energy planning tools**

Opis zadatka:

Energetski sustav otoka Mljeta iskorišten je za analize opisane u nekoliko znanstveno istraživačkih studija, koje su pokazale mogućnost integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav te su simulirani scenariji u kojima se iz obnovljivih izvora u potpunosti zadovoljavaju sve potrebe za energijom. Dosadašnje studije su uglavnom temeljene na agregiranim podacima o proizvodnji i potrošnji energije na otoku te simulacijama koje elektroenergetsku mrežu aproksimiraju s jednom točkom odnosno čvorom. Radi sagledavanja realne situacije i mogućnosti sadašnjeg sustava za integracijom energije iz varijabilnih, obnovljivih izvora potrebno je simulirati sustav s više čvorova.

U radu je potrebno:

1. Napraviti pregled literature i opisati NEPLAN model za energetske planiranje.
2. Analizirati rezultate proračuna energetskeg sustava otoka Mljeta rađene EnergyPLAN i sličnim modelima te napraviti pregled ulaznih podataka za modele.
3. Proračunati scenarije za proizvodnju iz fotonaponskih elektrana uz uvjet 5% „kritičnog viška proizvodnje električne energije“ u zatvorenom energetskeg sustavu otoka Mljeta.
4. Unijeti podatke o elektroenergetskom sustavu otoka Mljeta u NEPLAN model sukladno shemi elektroenergetskog sustava iz 2002. i novim podacima iz 2015. godine.
5. NEPLAN modelom proračunati proizvodnju iz solarnih fotonaponskih elektrana po čvorovima mreže sukladno instaliranoj snazi iz EnergyPLAN modela.
6. Usporediti i opisati rezultate proračuna.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

25. studenog 2015.

**1. rok:** 25. veljače 2016  
**2. rok (izvanredni):** 20. lipnja 2016.  
**3. rok:** 17. rujna 2016.

**1. rok:** 29.2., 02. i 03.03. 2016.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2016.  
**3. rok:** 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. NEPLAN.....	2
2.1. Općenito o programskom alatu NEPLAN .....	2
2.2. NEPLAN Electricity .....	2
2.2.1. Grafičko korisničko sučelje i upravljanje podacima.....	2
2.2.2. NEPLAN moduli .....	9
2.2.3. Analiza toka snage .....	11
2.2.4. Analiza kratkog spoja .....	12
2.2.5. Analiza pokretanja motora.....	14
2.2.6. Harmonijska analiza.....	16
2.2.7. Analiza pouzdanosti.....	17
2.2.7.1. Postupak provedbe analize pouzdanosti .....	18
2.2.8. Tok opterećenja s profilom opterećenja.....	18
2.2.9. Analiza niskog napona .....	20
2.2.10. Dimenzioniranje kabela .....	20
2.2.11. Optimalni tok snage .....	21
2.3. Sheme u NEPLAN modelu .....	22
2.3.1. Tehničke sheme, dijagrami i tablice .....	22
3. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA ENERGETSKOG SUSTAVA OTOKA MLJETA.....	26
3.1. Solarni modul.....	26
3.1.1. Podaci o sunčevom zračenju za otok Mljet.....	27
3.2. Analiza rezultata scenarija .....	28
4. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV OTOKA MLJETA.....	29
4.1. Potrošnja električne energije otoka Mljeta.....	31
4.2. Mogućnost instalacije fotonaponskih elektrana i utjecaj na mrežu .....	34
4.2.1. Utjecaj na mrežu .....	34
5. PRORAČUN U EnergyPLAN-u .....	36
6. PRORAČUN U NEPLAN-u .....	47
6.1. Izrada sheme u NEPLAN modelu.....	49
6.2. Rezultati proračuna u NEPLAN modelu .....	52
6.2.1. Napajanje fotonaponskim elektranama.....	52
6.2.1.1. Proračun toka snage .....	52

*Mirko Ivačić : Analiza integracije električne energije iz obnovljivih izvora u energetske sustav  
otoka Mljeta usporedbom EnergyPLAN i NEPLAN alata za energetske planiranje*

---

6.2.1.2. Tok opterećenja s profilom opterećenja.....	54
6.2.2. Napajanje kabelima.....	58
6.2.2.1. Proračun toka snage .....	58
6.2.2.2. Tok opterećenja s profilom opterećenja.....	59
ZAKLJUČAK .....	61
LITERATURA.....	63

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Elektroenergetski sustav s geografskom mapom u pozadini [1] .....	3
Slika 2.	Mrežni dijagram [1] .....	4
Slika 3.	Dijagram s grafičkim slojevima [1] .....	5
Slika 4.	Svojstva dijagrama-odabir boja [1] .....	6
Slika 5.	Primjer uređivanja simbola transformatora s tri namotaja [1] .....	7
Slika 6.	Primjer proračuna toka snage u NEPLAN-u [1] .....	11
Slika 7.	Struje kratkog spoja [1] .....	13
Slika 8.	Karakteristična krivulja momenta opterećenja i struje [1] .....	14
Slika 9.	Motori s glavnim parametrima u NEPLAN-u [1] .....	16
Slika 10.	Promjenjivost napona po danima .....	19
Slika 11.	Podaci o tipu kabela [1] .....	21
Slika 12.	Pregledna shema postrojenja [2] .....	23
Slika 13.	Strujna shema i tehnički podaci elemenata [3] .....	24
Slika 14.	Jednopolni i trolni prikaz [2] .....	25
Slika 15.	Srednje satno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu [4] .....	27
Slika 16.	Pokrivanje potrošnje u 2005. u Sunce 100% scenariju [4] .....	28
Slika 17.	Korištenje godišnjeg potencijala intermitentnih izvora u Sunce 100% scenariju [4] .....	28
Slika 18.	Elektroenergetski sustav otoka Mljeta [5] .....	29
Slika 19.	Godišnja potrošnja električne energije 2002. [4] .....	31
Slika 20.	Ukupna potrošnja električne energije za zapadni dio otoka u kWh 2015. ....	32
Slika 21.	Usporedba ukupne godišnje potrošnje .....	33
Slika 22.	Usporedba 24-satnog opterećenja .....	33
Slika 23.	Studija utjecaja instalacije FNE na otoku Mljetu na naponski nivo distribucijske mreže [5] .....	35
Slika 24.	Proračun u EnergyPLAN-u .....	36
Slika 25.	Serijska analiza u EnergyPLAN-u .....	37
Slika 26.	Ovisnost CEEP-a o snazi .....	38
Slika 27.	Prosječne mjesečne vrijednosti (kW) .....	39
Slika 28.	Satne vrijednosti (kW) .....	40
Slika 29.	Godišnja proizvodnja iz FNE i godišnji CEEP u kWh .....	40
Slika 30.	Proizvodnja električne energije u srpnju .....	41
Slika 31.	Proizvodnja električne energije u prosincu .....	41
Slika 32.	Potrošnja električne energije u srpnju .....	42
Slika 33.	Potrošnja električne energije u prosincu .....	42
Slika 34.	Proizvodnja električne energije za jedan dan u kolovozu .....	43
Slika 35.	Potrošnja električne energije za jedan dan u kolovozu .....	43
Slika 36.	CEEP za jedan dan u kolovozu .....	43
Slika 37.	Proizvodnja električne energije u jednom tjednu ožujka .....	44
Slika 38.	Potrošnja električne energije u jednom tjednu ožujka .....	44
Slika 39.	CEEP u jednom tjednu ožujka .....	45
Slika 40.	CEEP u ožujku .....	45
Slika 41.	Potrošnja električne energije u ožujku .....	46
Slika 42.	SCADA ispis za zapadni dio otoka [5] .....	47

Slika 43.	SCADA ispis za središnji dio otoka [5] .....	48
Slika 44.	Podaci o kabelu .....	49
Slika 45.	Podaci o transformatoru .....	50
Slika 46.	Prikaz transformatora, elektrane i trošila u NEPLAN-u .....	51
Slika 47.	Sabirnica.....	51
Slika 48.	Napajanje fotonaponskom elektranom.....	52
Slika 49.	Tok snage prema Pelješcu s istoka .....	53
Slika 50.	Tok snage prema Pelješcu sa zapada.....	54
Slika 51.	Snage fotonaponskih elektrana.....	54
Slika 52.	Profil predane snage u EES kod proizvodnje iz FNE .....	55
Slika 53.	Gubici kod proizvodnje iz FNE.....	56
Slika 54.	Struja kroz kabele kod proizvodnje iz FNE .....	57
Slika 55.	Napon na sabirnicama kod proizvodnje iz FNE.....	57
Slika 56.	Napajanje kabelom istočne strane otoka Mljeta.....	58
Slika 57.	Napajanje kabelom zapadne strane otoka Mljeta .....	59
Slika 58.	Gubici bez FNE .....	60
Slika 59.	Struja kroz kabele bez FNE.....	60



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Izračun pretvorbenog faktora $\chi_m$ [4] .....	27
Tablica 2. Usporedba stanja TS na području NP Mljet [5] .....	30
Tablica 3. Trafostanice izvan NP Mljet [5] .....	30
Tablica 4. Statistički podaci o potrošnji električne energije 2002. [4] .....	31
Tablica 5. Statistički podaci o potrošnji električne energije 2015. [5] .....	32
Tablica 6. Ukupna predviđena instalirana snaga fotonaponskih elektrana i godišnja proizvodnja [5] .....	34
Tablica 7. Rezultati dobiveni serijskom analizom u EnergyPLAN-u .....	37
Tablica 8. Fotonaponske elektrane .....	48

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$U$	kV	Napon
$I$	A	Električna struja
$P$	kW	Radna snaga
$M$	Nm	Okretni moment
$Q$	kVAr	Jalova (reaktivna) snaga
$R$	$\Omega$	Otpor
$X$	$\Omega$	Impedancija
$F$	Hz	Frekvencija
$T$	s	Vrijeme
$L$	H	Induktivitet zavojnice
$G$	S	Vodljivost
$C$	F	Kapacitet kondenzatora
$E_{demand}$	GWh/god	Zahtjev za električnom energijom
$CEEP$	GWh/god	„Kritični višak proizvodnje električne energije“
$E_{PV,pot}$	kWh	Električni intermitentni potencijal PV panela
$E_{PV,mjer}$	kWh	Mjereno ukupno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu
$\chi_m$	-	Pretvorbeni faktor
$\mu_{pV}$	-	Ukupna učinkovitost PV panela
$\mu_{PV,mod}$	-	Učinkovitost modula
$\mu_{PV,con}$	-	Učinkovitost DC/AC konvektora
$\mu_{PV,los}$	-	Koeficijent gubitaka
$\cos\varphi$	-	Faktor snage
$S$	-	Klizanje

## SAŽETAK

U ovom radu opisana je analiza integracije električne energije iz obnovljivih izvora u energetske sustav otoka Mljeta primjenom EnergyPLAN i NEPLAN alata za energetske planiranje.

Kako bi se odredio utjecaj obnovljivih izvora na energetske sustav otoka korišten je NEPLAN model te je dan opis samog programa i modula koje on koristi.

S obzirom na to da su analize i mogućnosti korištenja obnovljivih izvora energije na otoku Mljetu opisane u nekoliko istraživačkih radova, ukratko su se opisali rezultati tih proračuna i korišteni model.

S ciljem definiranja ulaznih podataka napravljena je analiza elektroenergetskog sustava otoka Mljeta i njegove potrošnje. U EnergyPLAN modelu proračunata je potrebna snaga fotonaponskih panela uz uvjet 5% „kritičnog viška proizvodnje električne energije“.

U NEPLAN modelu je napravljen proračun tokova snage po čvorovima mreže te je snaga dobivena EnergyPLAN modelom unesena u NEPLAN model i raspoređena po distribucijskoj mreži otoka Mljeta. Napravljena je usporedba s proizvodnjom fotonaponskih elektrana i bez njih.

Zaključak je dan na kraju, prije popisa literature.

Ključne riječi: električna energija, električna snaga, fotonaponske elektrane, NEPLAN model, EnergyPLAN model

## **SUMMARY**

This thesis describes the analysis of the integration of electricity from renewable energy sources into energy system of the island of Mljet using EnergyPLAN and NEPLAN energy planning tools.

To determine the impact of renewable energy sources on the energy system of the island NEPLAN model was used and at the beginning was NEPLAN and modules that he uses described.

Since are the analysis and the possibility of using renewable energy sources on the island of Mljet described in several research papers, the results of those calculations and model which was used are briefly described.

With the aim of defining the input data the analysis of the power system of the island of Mljet and its consumption were made. In Energy plan model it was calculated required output of photovoltaic panels providing the 5% of the critical excess electricity production.

In NEPLAN model it was calculated load flow per network nodes and the power calculated in EnergyPLAN model was entered in NEPLAN model and deployed per the distribution network of the island. A comparison with the production by photovoltaic power plants and without them was made.

The conclusion is given at the end, before references.

Key words: electricity, electrical power, photovoltaic power plants, NEPLAN, EnergyPLAN

## **1. UVOD**

Energetski sustav otoka Mljeta iskorišten je za analize opisane u nekoliko znanstveno istraživačkih studija, koje su pokazale mogućnost integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav te su simulirani scenariji u kojima se iz obnovljivih izvora u potpunosti zadovoljavaju sve potrebe za energijom. Dosadašnje studije su uglavnom temeljene na agregiranim podacima o proizvodnji i potrošnji energije na otoku te simulacijama koje elektroenergetsku mrežu aproksimiraju s jednom točkom odnosno čvorom. Radi sagledavanja realne situacije i mogućnosti sadašnjeg sustava za integracijom energije iz varijabilnih, obnovljivih izvora potrebno je simulirati sustav s više čvorova. Za analizu elektroenergetskog sustava koriste se EnergyPLAN i NEPLAN alati za energetske planiranje. U EnergyPLAN-u odredit će se snaga fotonaponskih panela koja će se potom rasporediti u NEPLAN modelu po čvorovima mreže. Podaci potrebni za proračun u EnergyPLAN modelu dobiveni su mjerenjem te omogućuju dobivanje realnih rezultata.

## **2. NEPLAN**

### **2.1. Općenito o programskom alatu NEPLAN**

NEPLAN je programski model koji služi za analiziranje, optimiziranje, planiranje i simuliranje električnih mreža, plinskih i vodenih mreža te daljinskog grijanja. NEPLAN je moguće koristiti u kombinaciji s drugim programskim alatima, npr. MATLAB/Simulink, AutoCAD, GIS, SCADA, čime se postiže bolje optimiziranje i modeliranje elektroenergetskih sustava. NEPLAN je dostupan kao aplikacija za stolno računalo i studentska verzija na internetu. NEPLAN se koristi u više od 600 kompanija u 80 država diljem Svijeta. Ponajviše se koristi u manjim ili većim elektroenergetskim poduzećima, industrijskim pogonima te sveučilištima. Hrvatska elektroprivreda s ciljem modernizacije poslovanja i olakšanog vođenja elektroenergetskih postrojenja koristi NEPLAN.

### **2.2. NEPLAN Electricity**

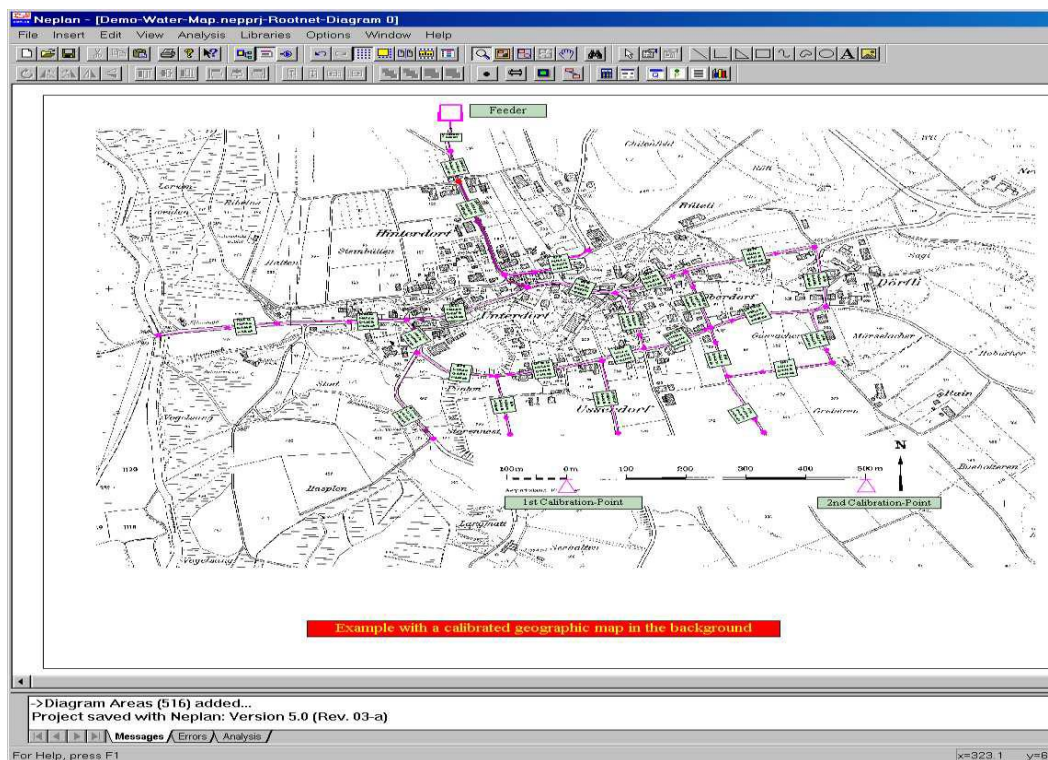
Koristi se za analiziranje, planiranje i simuliranje električnih mreža. Grafičko sučelje je prilagođeno korisniku te omogućuje efikasno izvođenje različitih studija slučajeva. Prilagodljiv softver ima modularni koncept i obuhvaća sve električne aspekte u prijenosu, distribuciji i proizvodnji električne energije. To je najprikladniji i najčešće korišteni programski alat kod proračuna i integracije električne energije iz obnovljivih izvora te kod proračuna pametnih mreža jer su svi potrebni modeli i simulacijske metode povezani te se postiže visoka točnost i performanse. Uz stabilne izračune, kvalitetno napajanje, optimizaciju električnih aspekata i zaštitu mreže, NEPLAN omogućuje modeliranje vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana pomoću regulacije za dinamičke simulacije [1].

#### **2.2.1. Grafičko korisničko sučelje i upravljanje podacima**

Upravljanje podacima:

- Svi podaci se mogu unijeti grafički i/ili tablično (kao u Excel-u).
- Ne postoji ograničenje veličine i broja čvorova i elemenata.
- Dostupnost opsežnih funkcija uređivanja za obradu mrežnog dijagrama npr. poništiti, ponoviti, brisati, kopirati, premještati, uvećati. Element se može premjestiti iz jednog čvora u drugi bez brisanja.

- OLE (povezivanje i dodavanje objekata) funkcionalnost: podaci mogu biti premješteni i iz softvera treće strane (MS-Excel, MS-Word). Jednostavnost projektne dokumentacije.
- Mogućnost implementacije sučelja prema vanjskim programima.
- Uvoz geografske mape kao pozadine, za lakše pozicioniranje elemenata
- Uvoz gotovo svih rasterskih i vektorskih grafičkih datoteka (npr. PCX i DXF datoteke). Na slici 1. prikazana je pozadinska rasterska grafika.
- Grafika se može izvesti kao rasterska datoteka (npr. JPG).
- Opcija za kombiniranje i odvajanje mreža. Moguć je bilo koji broj neovisnih mrežnih područja i zona. Svaki element i čvor može pripadati bilo kojem neovisnom mrežnom području ili zoni.
- Dostupne su opsežne funkcije za statistiku i dokumentaciju mreže.
- Svi proračunski moduli nalaze se u zajedničkoj bazi podataka.
- Integrirani sustav za upravljanje grafikonima omogućuje analizu i usporedbu svih rezultati iz svih varijanti.
- Grafičko sučelje je višezjezično.



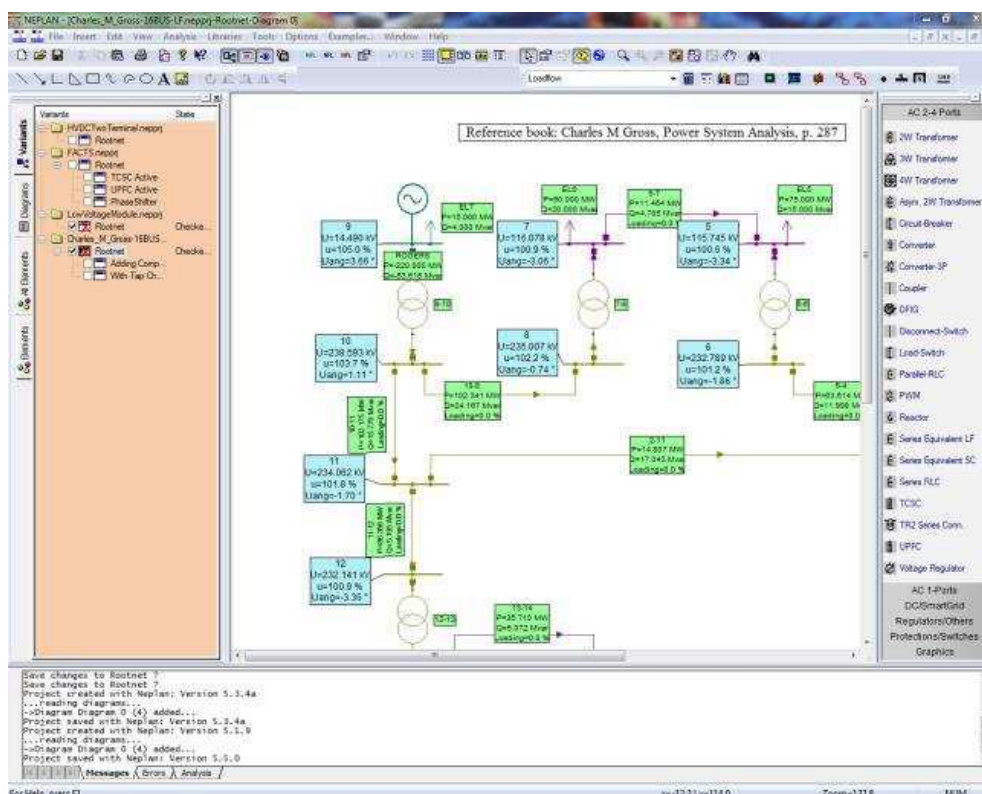
Slika 1. Elektroenergetski sustav s geografskom mapom u pozadini [1]

#### Upravljanje mrežom:

- Za svaku mrežu može se odabrati: željeno uklopno stanje, željeno opterećenje stanja
- Za svaku mrežu može se definirati i pohraniti bilo koji broj varijanti i podvarijanti. Varijante se mogu usporediti, povezati i brisati.
- Dijagrami različitih projekata i varijanti mogu biti prikazani u isto vrijeme.
- Rezultati dvije različite varijante mogu se prikazati na zajedničkom dijagramu i usporediti u sustavu za upravljanje grafikonima

#### Prikaz mreže:

- Mreža se može unijeti u nekoliko različitih blok dijagrama, tako da je primjerice visokonaponska mreža u jednom dijagramu, a srednjenaponska mreža u jednom ili više dijagrama. Na slici 2. prikazan je primjer mrežnog dijagrama.

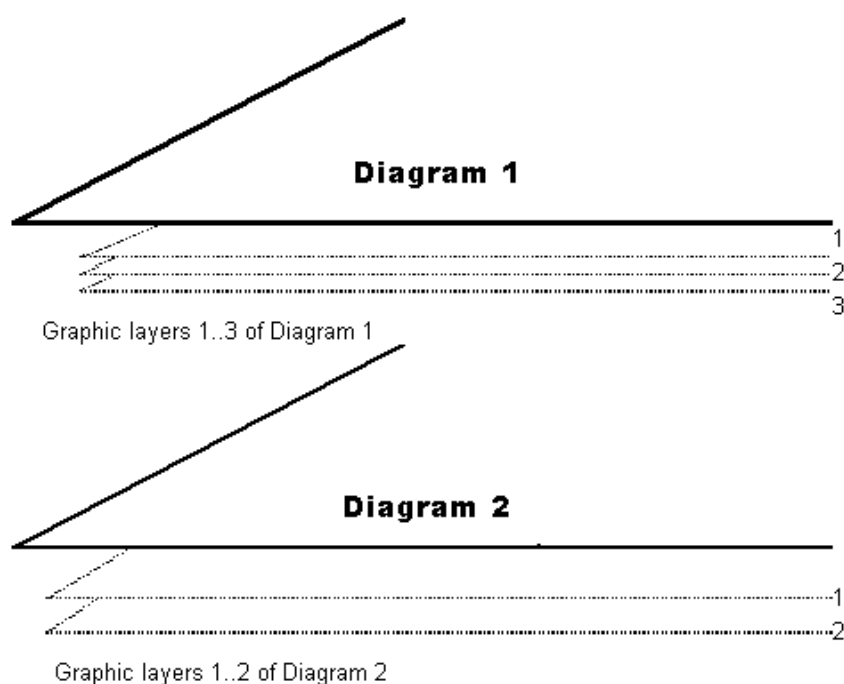


Slika 2. Mrežni dijagram [1]

- Svaki blok dijagram može imati bilo koji broj grafičkih slojeva koji mogu biti obojeni, zaključani, skriveni ili vidljivi. Dijagrami sa pripadajućim slojevima prikazani su na slici 3.



- Uvećani prikaz stanice: na općem dijagramu stanica je prikazana kao crna kutija dok je na drugom dijagramu prikazana u detalje sa svim svojim prekidačima, zaštitnim uređajima i drugim instrumentima.
- Topološka povezanost elemenata na više dijagrama.
- Svi dijagrami uzimaju se u obzir za različite analize (npr. tokovi snaga)
- Jedan element može imati više od jednog grafičkog prikaza u istom dijagramu ili u različitim dijagramima.



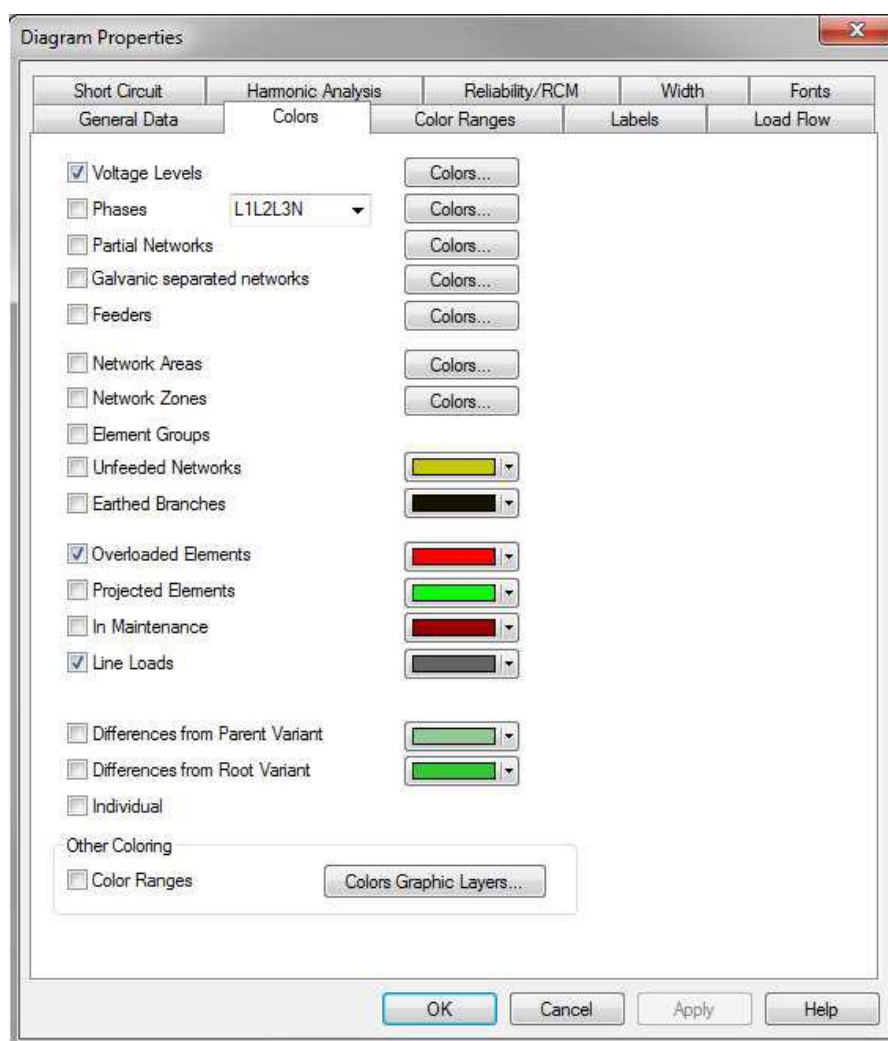
**Slika 3. Dijagram s grafičkim slojevima [1]**

Pomoćna grafika:

- Može se koristiti za dokumentiranje dijagrama.
- Unošenje linija, pravokutnika, elipsi, lukova, poligona, polilinja, bilo koje vrste bitmap grafike.
- Unos korisničkog teksta s mogućnošću odabira skupa znakova.
- Korisnik može birati boju pozadine, elementa, linija, konture i boju ispune.
- Dostupna je rotacija i poravnanje elemenata kod preklapanja

Mrežni dijagram-označavanje:

- Može se odabrati bilo koja boja i tip linije
- Elementi preopterećeni nakon analize toka snage ili analize struje kratkog spoja istaknuti su bojom
- Mogu se istaknuti izolirani elementi.
- Opcije bojanja kako bi se razlikovala odabrana mrežna područja, zone, naponske razine, faze, uzemljene mreže ili mreže koje se ne napajaju i galvanski odvojene mreže (Slika 4.).
- Svaki element i grafički sloj mogu se zasebno obojiti.
- Izračunate varijable mogu se obojiti s obzirom na svoju vrijednost (prema padu napona ili prema gubicima).

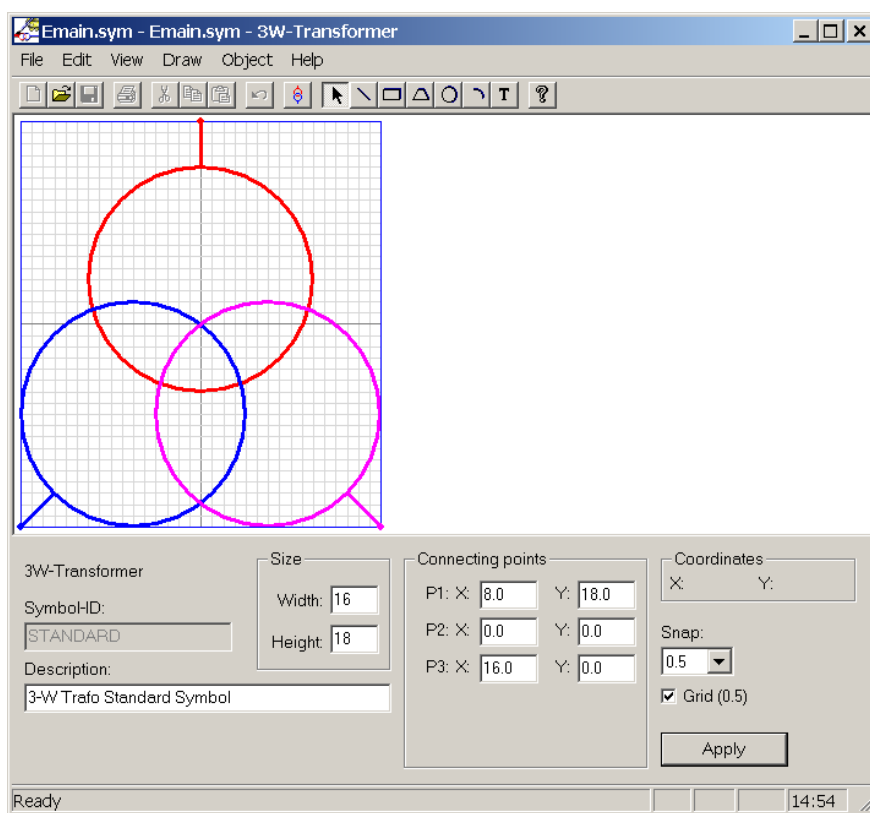


Slika 4. Svojstva dijagrama-odabir boja [1]

Uređivanje simbola:

- Korisnik može za svaki element ili čvor napraviti i definirati vlastiti simbol.
- Može se definirati bilo koji broj različitih simbola za element ili čvor.
- Kod ulaza u dijagram prikazat će se svi simboli te je potrebno povući i ispustiti željeni simbol u dijagram.
- Na dijagramu se simboli mogu zrcaliti, rotirati te im se može mijenjati veličina.

Na slici 5. prikazan je primjer uređivanja simbola transformatora s tri namotaja (eng. three winding transformer).



**Slika 5. Primjer uređivanja simbola transformatora s tri namotaja [1]**

Upravljanje grafikonima:

- Omogućuje prikaz rezultata u različitim grafikonima.
- U jednom grafikonu može se prikazati više pod-grafikona.
- U istom grafikonu mogu se prikazati i usporediti rezultati različitih varijanti.

Povezanost sa SQL bazom podataka:

- SQL (Structured Query Language) je najpopularniji računalni jezik za izradu, traženje, ažuriranje i brisanje podataka iz relacijskih baza podataka.
- Svi podaci elemenata mogu biti uvezeni/izvezeni u bilo koju SQL bazu podataka (npr. Oracle, MS-Access).
- SQL baze podataka uključuje svu mrežnu opremu (zaštitne uređaje, podatke definirane od strane korisnika, itd.)
- Može se pohraniti topologija mreže.
- Grafika elemenata i čvorova se može uvesti/izvesti.
- Vrlo fleksibilno pohranjivanje i uvoz značajki ili ažuriranje, pohranjuje samo razlike u varijantama, mrežne zone ili područja te naponske razine.
- Mogućnost obrade vrlo velikih mreža.

Upravljanje bibliotekom:

- Potpuna integracija sveobuhvatnog upravitelja bibliotekom.
- NEPLAN nudi opsežnu biblioteku elemenata za vodove, sinkrone i asinkrone strojeve, transformatore, harmonijske strujne izvore i karakteristike motora.
- Prilikom unosa podataka o mreži može se pristupiti podacima u biblioteci. Nadalje podaci uneseni u mrežu mogu biti izvezeni u biblioteku.
- Podaci se mogu uvesti/izvesti iz Excel-ovih tablica.
- Uvoz/izvoz podataka u bilo koju SQL bazu podataka.
- Dio dijagrama sa svim tehničkim podacima može se pohraniti u biblioteku (koristi se za IEEE upravljačke krugove).

Pohranjivanje podataka i sučelja

NEPLAN pohranjuje sve podatke o mreži, poput jednopolnog prikaza, zaštitnih uređaja, regulatora, parametara za izračun te rezultata u internoj bazi podataka tzv. NEPLAN Library, kako bi se podaci unosili na lakši i brži način. NEPLAN predstavlja vrlo otvoren sustav, svi podaci su dostupni vanjskim sustavima.

Postoji nekoliko načina na koje se može podatke prenijeti iz ili u NEPLAN:

- NEPLAN programska biblioteka (eng. NEPLAN programming Library-NPL)
- ASCII datoteke (MS-Excel)
- GIS/SCADA sučelje
- SQL baze podataka

ASCII datoteke omogućuju uvoz/izvoz svih:

- električnih parametara primarnih elemenata, npr. linija, transformatora, električnih generatora, motora
- opterećenja i mjerenih podataka, kao i unaprijed definiranih profila opterećenja
- tipova i opcija zaštitnih uređaja
- harmonijskih struja i napona
- upravljačkih krugova podataka (funkcijski blokovi)

GIS/SCADA sučelje podržano je od strane mnogih GIS proizvođača i to je ASCII datoteka koja uključuje samo najnužnije informacije, kao što su grafičke informacije, međusobno povezivanje elemenata, uklopno stanje, tipovi elemenata i duljina linija. Električni podaci preuzeti su iz NEPLAN biblioteke (eng. NEPLAN Library).

### **2.2.2. NEPLAN moduli**

Program za analizu elektroenergetskog sustava NEPLAN sastoji se od nekoliko modula koji se mogu kupiti zasebno.

Moduli se mogu podijeliti na sljedeći način:

Osnovni moduli:

- Tok opterećenja (snage), analiza slučaja
- Analiza kratkog spoja
- Harmonijske analize
- Analize pokretanja motora
- Proračun linijskih parametara
- Smanjenje mreže
- Investicijska analiza (sadašnja vrijednost, eng. present value-PV)

- Dinamički simulator
- Zaštita od strujnog preopterećenja
- Analiza pouzdanosti
- NEPLAN programska biblioteka (NPL)
- Sučelje GIS/SCADA (SQL, ASCII)

Prijenosni moduli:

- Osnovni moduli
- Ograničeni optimalni tok snaga
- Analiza sposobnosti dostupnih prijenosa
- Stabilnost napona
- Stabilnost malih signala
- Prognoza zagušenja mreže dan unaprijed
- Analiza sustava uzemljenja

Distribucijski moduli:

- Osnovni moduli
- Predviđanje opterećenja, profil opterećenja
- Optimizacija distribucijske mreže
- Procjena mrežnih smetnji
- Optimalno pojačanje sustava napajanja
- Optimalno postavljanje kondenzatora
- Zamjena faza
- Strategija za optimalnu obnovu mreže
- Termička analiza kabela
- Proračun niskonaponskih sustava
- Pronalazak grešaka

Industrijski moduli:

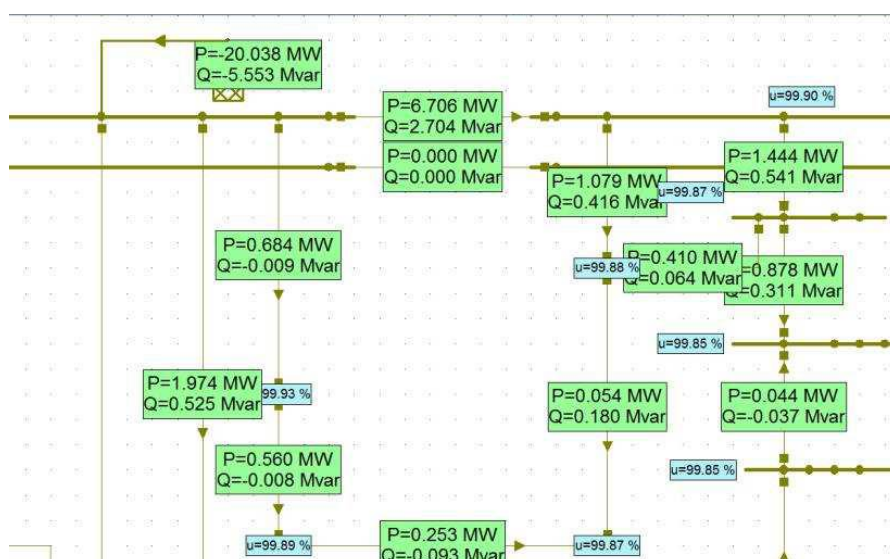
- Osnovni moduli
- Dimenzioniranje kabela
- Analiza sustava uzemljenja

### 2.2.3. Analiza toka snage

Osnovne karakteristike:

- Proračunske metode: Trenutna iteracija, Newton-Raphson, Proširena Newton-Raphson-ova, Pad napona po fazi, Tok snaga kod izmjenične struje
- Trofazni, dvofazni i jednofazni AC i DC sustavi za umrežene, radijalne i mreže u obliku petlje s visokim do niskog napona
- Prostorno raspršeni modeli proizvodnje (vjetroelektrane, fotonaponske elektrane, male hidroelektrane, geotermalne elektrane)
- Kontrola napona i toka s transformatorima s faznim pomakom
- HVDC (HV-Visoki napon, DC-Istosmjerna struja), PWM (modulacija širine pulsa), FACTS (fleksibilni prijenosni sustav s AC-izmjeničnom strujom) uređaji
- Izmjenjivanje snage između područja/zona (kontrola područja izmjene) i distribuiranih čvorova
- Unaprijed definirani i korisnički definirani faktori skaliranja za brzo opterećenje i promjenjivu proizvodnju
- Mjerenje ulaznih podataka i uravnoteženje opterećenja
- Proračun gubitka osjetljivosti
- Provjera limita i prikladna automatska konverzija tipa čvora

Na slici 6. prikazan je proračun tokova snage u NEPLAN-u. Moguće je odrediti radnu snagu u MW te jalovu snagu u MVar (megavoltampera reaktivnih).



Slika 6. Primjer proračuna toka snage u NEPLAN-u [1]

Rezultati:

- Rezultati se prikazuju automatski (vidi sliku 6.).
- Blokove s rezultatima moguće je premještati i brisati.
- Korisnik sam definira izlazne rezultate: korisnik može odabrati stavke, jedinice, font, preciznost i poziciju.
- Preopterećeni elementi ili čvorovi s naponima izvan definiranih granica su istaknuti.
- Debljina linije odgovara opterećenju elementa.
- Rezultati se mogu spremati u tekstualnom obliku (ASCII)
- Tablica izlaznih rezultata: za cijelu mrežu, individualno za svako područje/zonu. Prikaz tokova snage između područja/zona, preopterećenih elemenata, selektivni prikaz i funkcija sortiranja.
- Tablicu je moguće unijeti u MS-Excel.

#### **2.2.4. Analiza kratkog spoja**

Osnovne karakteristike:

- Trofazni, dvofazni, jednofazni AC sustavi ili DC mreže
- Metoda superpozicije unaprijed uzimajući u obzir kvarove napona
- Proračun jednofaznih, dvofaznih i trofaznih grešaka
- Mogućnost proračuna korisnički definiranih pogrešaka (greška između dvije naponske razine)
- Opcija proračuna grešaka na vodovima (korisnik može odabrati lokaciju greške na vodu)
- Tipovi struja kod računanja grešaka: početna simetrična struja kratkog spoja i snaga, vršna, toplinska i asimetrična struja razbijanja, struja razbijanja kod ustaljenog stanja, izmjenična struja
- Izračun minimalne/maksimalne struje kratkog spoja
- Ograničenje struje zbog prekidača i otpornika

Spajanje vodova:

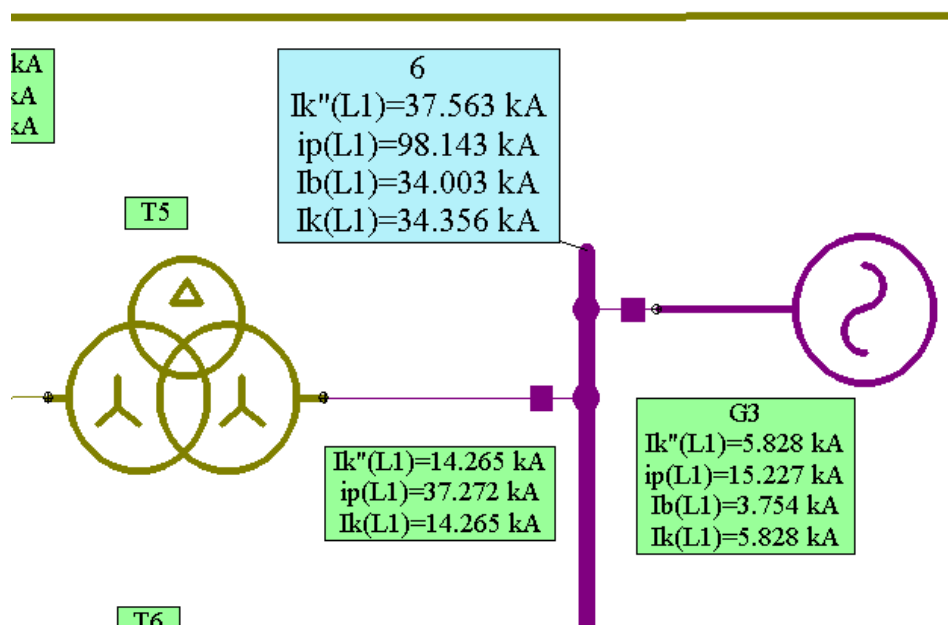
- Za proračun struja kratkog spoja dozvoljene su međusobne impedancije i kapaciteti u pozitivnim i negativnim slijednim sustavima.



- Strujni krugovi i spojni parametri nadzemnih vodova izračunavaju se iz konfiguracije vodiča.
- Nadzemni vodovi sa šest trofaznih sustava i tri uzemljene žice mogu se proračunati, potrebno je uzeti u obzir uzemljenje trofaznog sustava.
- Može se unijeti neograničen broj nadzemnih vodova.
- Parametri i konfiguracija vodiča spremaju se u SQL bazu podataka.

#### Rezultati:

- Automatski prikaz kao i kod analize toka snage.
- Za izlazne rezultate može se definirati jedinica, format i tip struje.
- Rezultati se mogu umetnuti na početak i/ili kraj čvora, ili u središte elementa.
- U slučaju pojave kratkog spoja svi preopterećeni elementi su istaknuti.
- Popis rezultata može se spremiti kao tekstualna datoteka.
- Izlazni rezultati sortirani su prema naponskim razinama.
- Impedancija kratkog spoja i sve izračunate struje dobivene su kao fazne vrijednosti ili kao simetrične komponente (na slici 7. prikazane su struje kratkog spoja)

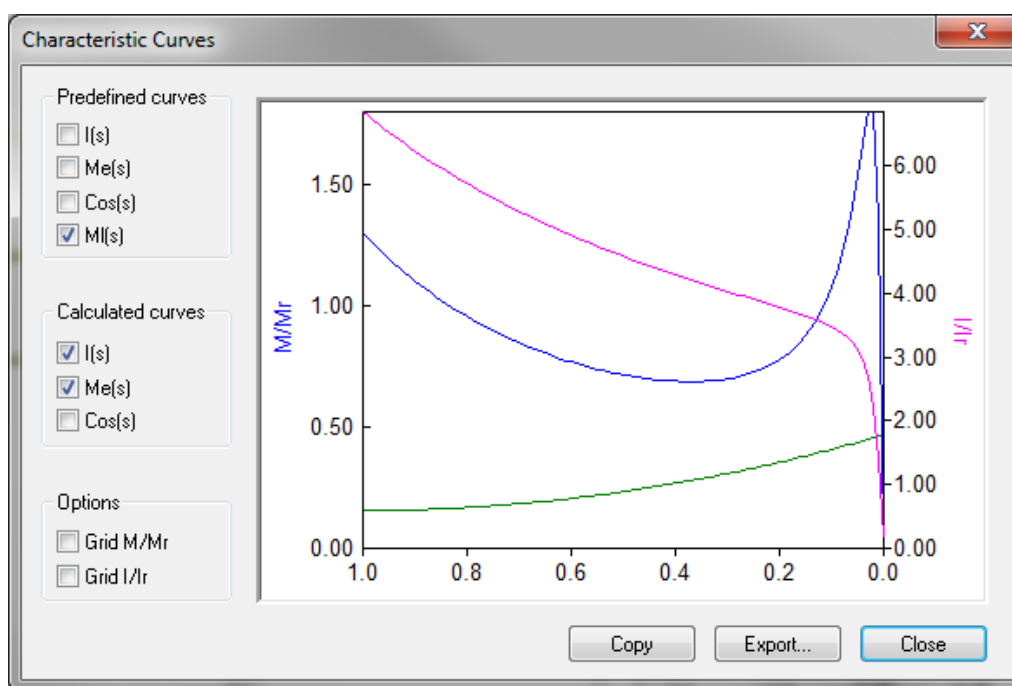


Slika 7. Struje kratkog spoja [1]

### 2.2.5. Analiza pokretanja motora

Proračun pokretanja motora:

- Simulacija pokretanja motora u neograničenim mrežama.
- Istovremeno pokretanje ili pokretanje s vremenskim kašnjenjem za bilo koji željeni broj motora.
- Identifikacija parametara motora metodom najmanjih kvadrata iz ulaznih vrijednosti za okretni moment, struju i faktor snage ( $\cos\phi$ ) u ovisnosti o klizanju tj. razlici brzine vrtnje rotora i okretnog magnetskog polja.
- Različiti modeli motora, ovisno o unesenim podacima o motoru.
- Biblioteke standardnih podataka o motoru te dodatne biblioteke za  $M(s)$ ,  $I(s)$ ,  $\cos\phi(s)$ .
- Proračun radne točke za sve motore koji se ne pokreću u skladu je s njihovom karakteristikom opterećenja (prema Newton-Raphson metodi).
- Moment opterećenja unosi se kao karakteristična (slika 8.), linearna ili kvadratna krivulja momenta opterećenja.



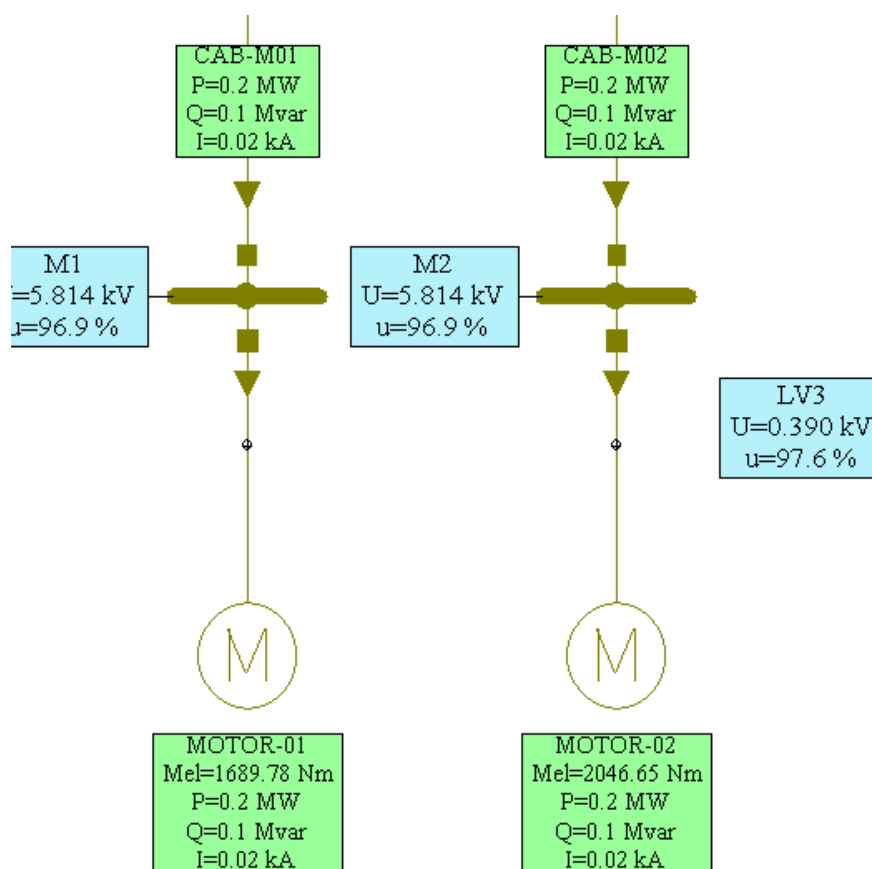
Slika 8. Karakteristična krivulja momenta opterećenja i struje [1]

Pad napona:

- Proračun pada napona u trenutku  $t=0$ .
- Smanjen unos podataka za motore i računanje parametara.
- Motori koji se ne pokreću mogu se simulirati opterećenjem koje je definirao korisnik (konstantna snaga).
- Preopterećeni elementi, mjerni instrumenti i zaštitni uređaji ili čvorovi s naponima izvan definiranih granica su istaknuti.
- Rezultati izračuna pada napona prikazani su na jednopolnom dijagramu
- Unesenim podacima o motoru i izračunatim parametrima motora može se pristupiti klikom na željeni motor u jednopolnom dijagramu.

Rezultati:

- Izračun napona  $U(t)$  za unaprijed definirane čvorove.
- Izračun struje  $I(t)$ , snage  $P(t)$ , jalove snage  $Q(t)$  za svaki od unaprijed definiranih elemenata.
- Izračun struje koja teče kroz motor  $I$ , momenta opterećenja  $M$ , elektromagnetskog momenta  $M_e$ , radne snage  $P$  i reaktivne(jalove) snage  $Q$  u funkciji vremena ili klizanja. Na slici 9. prikazan je dijagram na kojem se nalaze dva motora s navedenim parametrima.
- Grafički prikaz karakteristične krivulje i vremenske karakteristike, s automatskim skaliranjem osi.
- Dimenzije i boje mogu se mijenjati.
- Liste s rezultatima mogu se spremiti kao tekstualne datoteke.



Slika 9. Motori s glavnim parametrima u NEPLAN-u [1]

## 2.2.6. Harmonijska analiza

Osnovne karakteristike:

- Jednofazni, dvofazni i trofazni AC sustavi (AC-izmjenična struja).
- Frekvencijski odziv umreženih mreža.
- U-I i I-U osjetljivost za svaku frekvenciju.
- Izračun impedancije mreže i harmonijske razine za svaku frekvenciju i svaki čvor.
- Frekvencija ovisi o odabranim elementima.
- Automatska regulacija duljine koraka frekvencije tijekom izračuna impedancije kako bi se detektirale rezonancije.
- Izračun u sustavu s pozitivnim komponentama (simetrični sustav) ili faznom sustava.
- Proračun impedancija vlastitih i međusobnih vodova u ovisnosti o frekvenciji.
- Harmonijski tok opterećenja (I, U, P, Q, gubici)

- Rezultati u frekvencijskoj ili vremenskoj domeni.

Harmonijske razine:

- Struja i napon računaju se kod svih frekvencija te na svim unaprijed definiranim čvorovima i elementima.
- Izračun ukupnog harmonijskog napona u skladu s DIN/IEC normom te faktora distorzije u skladu s IEEE standardom.
- Poželjna je usporedba izračunatih harmonijskih razina s graničnim vrijednostima propisanim u bilo kojim standardima.
- Automatski unos rezultata u jednopolnom dijagramu.
- Izračun sume harmonika: aritmetički, vektorski, geometrijski prema IEC 1000-2-6
- Sa svakim harmonikom može se izračunati neograničen broj harmonijskih izvora (struja/napon).

#### **2.2.7. Analiza pouzdanosti**

Određivanje frekvencije, prosječnog trajanja i troška kvarova mrežnih komponenti koji uzrokuju prekid opskrbe.

Razmatra se:

- Ponašanje mrežne opreme kod ispadanja iz rada (učestalost kvara i broj popravaka).
- Rad mreže u normalnom stanju i kod nepredviđenih situacija.
- Dopušteno kratkotrajno preopterećenje komponente.
- Koncept zaštite uključujući i kvarove zaštite.
- Realni obrasci proizvodnje i krivulje opterećenja.

Analiza pouzdanosti nužna je za:

- Optimalnu raspodjelu kapitala i analizu isplativosti kod ulaganja u prijenosnu i distribucijsku mrežu.
- Projektiranje i evaluaciju inovativnih transformatorski stanica.
- Analizu slabih točaka u postojećim mrežama.
- Projektiranje automatiziranih koncepata u mrežama javne i industrijske distribucije.
- Detaljnu i objektivnu raspravu o konceptima mrežnih priključaka za zahtjevnije kupce i energetska postrojenja.

#### 2.2.7.1. Postupak provedbe analize pouzdanosti

Relevantni kvarovi komponenata:

- Primarni kvarovi: stohastički kvarovi, kvarovi zajedničkog načina rada
- Sekundarni kvarovi: preklapajući nezavisni stohastički zastoji, kvarovi tijekom održavanja rezervnih komponenti, kvarovi zaštite, višestruki kvarovi uzemljenja

Računa parametre:

- Učestalost prekida opskrbe,  $f_d$  (1/god)
- Vjerojatnost prekida opskrbe,  $q_d$  (min/god)
- Srednji prekid trajanja opskrbe,  $T_d$  (h)
- Energija koja nije isporučena na vrijeme,  $E_d$  (MWh/god)
- Troškovi prekida  $C_d$  (\$/god)

Prezentacija rezultata:

- Rezultati se ispisuju na opterećenim čvorovima u mrežnom planu
- Sjenčanje boja na mrežnom grafikonu u ovisnosti o rezultatima pouzdanosti.
- Funkcije filtriranja za detaljnije analize.
- Rezultati se u potpunosti mogu izvesti kako bi se prikazali tablično

Funkcije za ocjenjivanje:

- Uzimanje u obzir snage/energije-specifični troškovi prekida.
- Filter za istraživanje doprinosa komponente na prekid opterećenja čvora.
- Analiza reakcije sustava nakon kvara.

#### 2.2.8. Tok opterećenja s profilom opterećenja

Ulazni podaci:

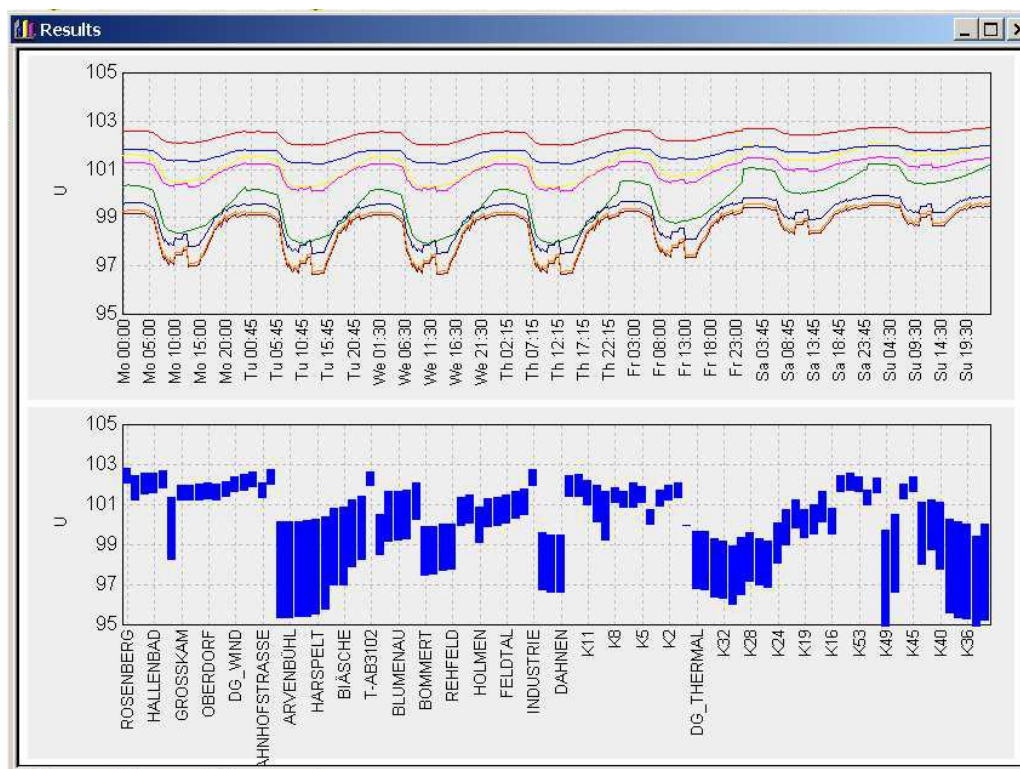
- Opterećenja i proizvodni profili definirani od strane korisnika (dnevni, tjedni, mjesečni i godišnji faktori).
- Neograničen broj tipova profila za potrošače i proizvođače (kućanstva, industrijski pogoni)
- Uvoz mjernih podataka i profila opterećenja.

Izračun:

- Pojedinačni proračun toka opterećenja (predviđanje opterećenja) i vremenska simulacija.
- Korisnik definira prirast vremena.
- Kombinacija vremenskih intervala.
- Metoda uravnoteženja opterećenja: opterećenja se automatski mijenjaju tako da rezultati toka opterećenja odgovaraju izmjerenim vrijednostima.

Rezultati:

- Veliki raspon vrijednosti u vremenu.
- Karakteristike mreže, elemenata i čvorova (naponi, struje, opterećenja, snaga, gubici energije i snage). Na slici 10. prikazana je karakteristika napona po danima.
- Mogućnost plotanja i uspoređivanja vrijednosti.



Slika 10. Promjenjivost napona po danima

### **2.2.9. Analiza niskog napona**

Karakteristike:

- Proračun pada napona i opterećenja kabela s varijabilnim faktorom istovremenosti za različite potrošače.
- Faktor istovremenosti ovisi o broju istovrsnih opterećenja u sustavu napajanja ili vodu.
- Unaprijed definirani potrošači: kućanstva, sustavi za skladištenje topline noću, sustavi za obradu tople vode, grijači s konstantnim protokom vode.
- Korisnik može definirati tipove potrošača i njihova svojstva.
- Izračun kratkog spoja kod trofaznog i jednofaznog sustava.
- Provjera selektivnosti osigurača.

### **2.2.10. Dimenzioniranje kabela**

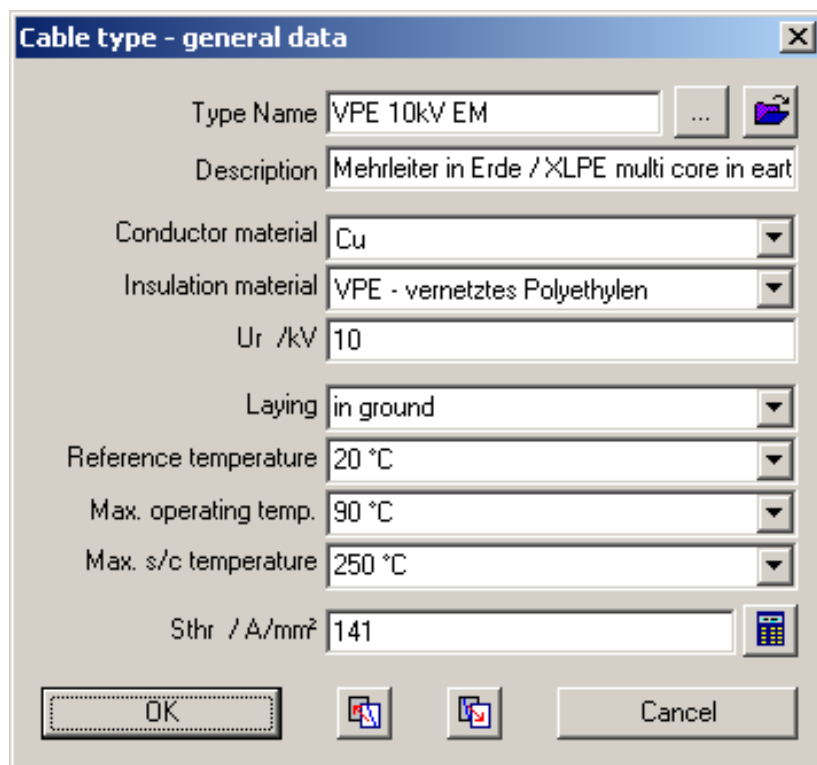
Svojstva:

- Mogućnosti izbora tipa kabela i poprečnog presjeka te zaštitnog uređaja za pretpostavljeno opterećenje. Na slici 11. prikazani su osnovni podaci o tipu kabela.
- Duljinu kabela određuje korisnik.
- Tip kabela odabire se iz unaprijed definirane biblioteke kabela koja se nalazi unutar NEPLAN-a.
- Automatski odabir klase i postavki zaštitnog uređaja.
- Dimenzioniranje jednog ili više kabela istovremeno.
- Maksimalna duljina odabrane vrste kabela za odjeljak u kojem je još ispunjen zadani kriterij.
- Provjera instaliranih kabela.

Kriteriji dimenzioniranja:

- Zaštita kabela od preopterećenja.
- Dopusnjeni pad napona i naponske granice.
- Zaštita od opasnog napona štetnog za čovjeka, utjecaj isključiti u podnošljivom vremenu.
- Zaštita kabela od kratkoročnog pregrijavanja.





The screenshot shows a dialog box titled "Cable type - general data". It contains the following fields and options:

- Type Name: VPE 10kV EM
- Description: Mehrleiter in Erde / XLPE multi core in eart
- Conductor material: Cu
- Insulation material: VPE - vernetztes Polyethylen
- Ur /kV: 10
- Laying: in ground
- Reference temperature: 20 °C
- Max. operating temp.: 90 °C
- Max. s/c temperature: 250 °C
- Sthr / A/mm²: 141

At the bottom, there are buttons for "OK", "Cancel", and two icons representing different cable types.

Slika 11. Podaci o tipu kabela [1]

### 2.2.11. Optimalni tok snage

Osnovna svojstva:

- Kontrolne varijable: radna i jalova snaga, referentne vrijednosti HVDC i FACTS sustava.
- Varijabilna ograničenja za napone sabirnice, radna i jalova snaga generatora.
- Primjenjivo na cijelu mrežu ili na određeno područje/zonu.
- Cilj je smanjiti gubitke snage i troškove proizvodnje.

Rezultati:

- Automatski prikaz rezultata.
- Rezultati optimizacije-obvezujuća ograničenja, varijable na granicama, osjetljivost, kontrola mreže.
- Korisnik odabire jedinice, font, preciznost i poziciju izlaznih vrijednosti.
- Preopterećeni elementi ili čvorovi s naponima izvan unaprijed definiranih granica su istaknuti.

- Debljina linije odgovara opterećenju elementa.
- Rezultati se mogu spremiti kao tekstualna datoteka.
- Tablični izlaz za cijelu mrežu ili individualno za svako područje/zonu. Izlaz tokova snage između područja/zona te opterećenih elemenata.
- Tablica se može povezati s MS-Excel.

## **2.3. Sheme u NEPLAN modelu**

### **2.3.1. Tehničke sheme, dijagrami i tablice**

Međusobnu povezanost i funkcionalne odnose između pojedinih dijelova mreže, postrojenja i skupine uređaja prikazuje shema tj. mrežni dijagram. Dijagrami (grafikoni) prikazuju odnose između raznih operacija, operacija i vremena, operacija i fizikalnih veličina, stanja raznih elemenata. Tablica zamjenjuje ili dopunjava shemu ili dijagram.

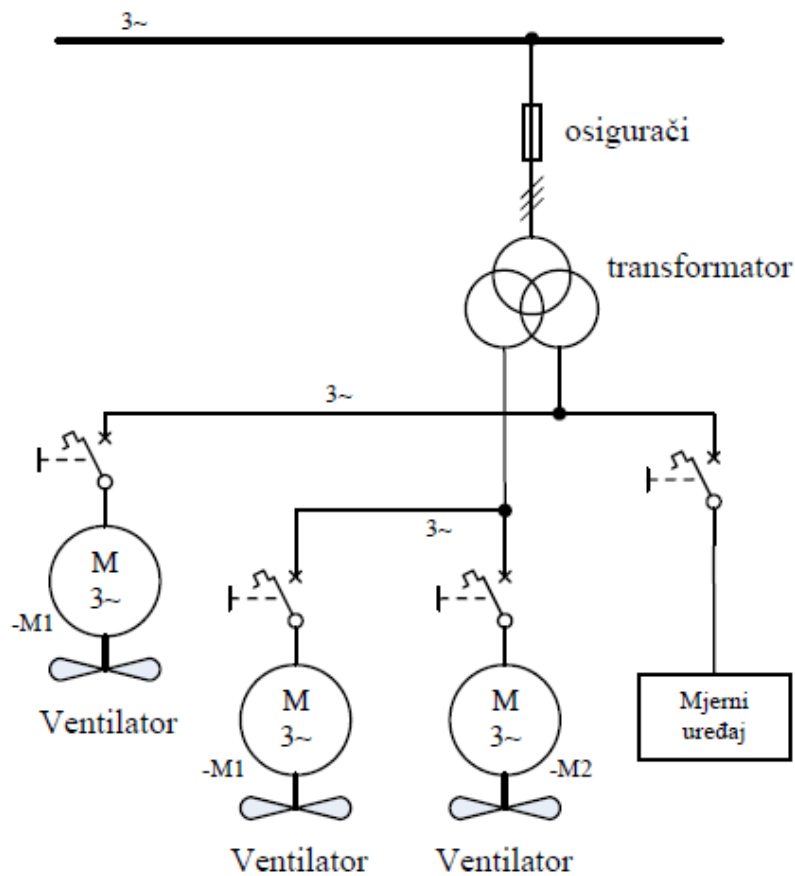
Za prikaz pojedinih elemenata koriste se grafički simboli. Pomoću propisanih oznaka simbol opisuje djelovanje nekog elementa. Norme za elektrotehničko područje formiraju se preuzimanjem međunarodnih IEC (Međunarodna elektrotehnička komisija) normi i njihovim prevođenjem na hrvatski jezik.

Vrste shema:

#### **1) Pregledna shema**

- Pojednostavljen prikaz postrojenja, omogućuje jednostavno razumijevanje procesa.
- Prikazuje najvažnije dijelove postrojenja i najvažnije podatke glavnih elemenata.
- Najvažniji dijelovi postrojenja prikazani su simbolima.
- Postrojenje dijeli na temelju funkcionalne ili prostorne osnove.
- Elementi se često označavaju opisno, upisuju se nazivi s osnovnim električnim veličinama (snaga, napon, struja).
- Prikazuje glavne vodove, ali može i pomoćne. Crta se jednopolno.

Na slici 12. prikazana je pregledna shema postrojenja. Vidimo tri trofazna izmjenična motora, transformator s tri namotaja, osigurač, prekidače, ventilatore koje pogone motori i mjerni uređaj [2].

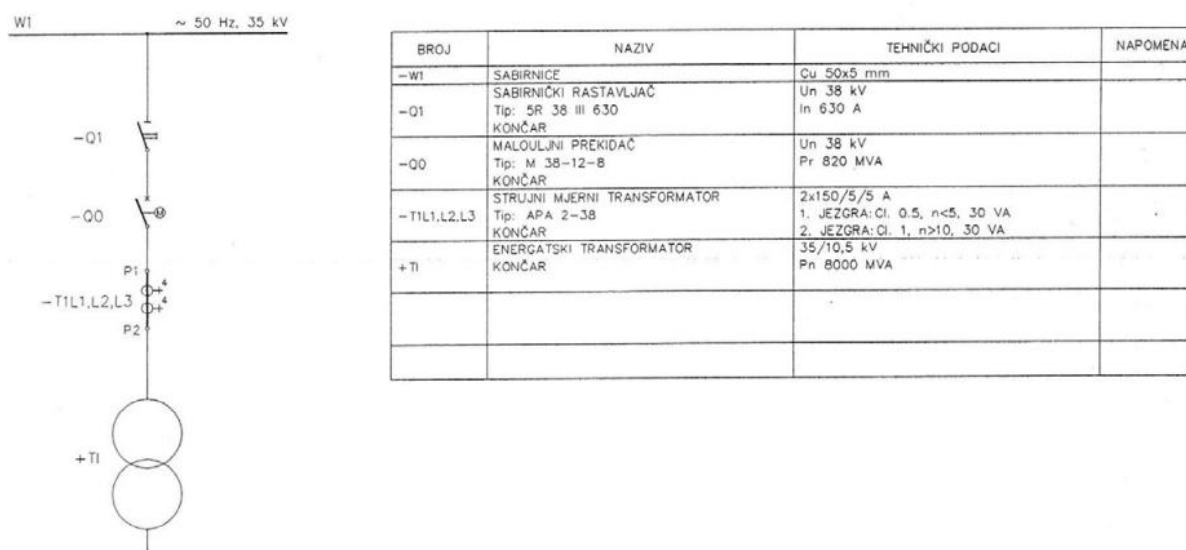


Slika 12. Pregledna shema postrojenja [2]

## 2) Strujna shema

- Prikaz djelovanja postrojenja ili uređaja sa svim pojedinostima.
- Sve električne, mehaničke i ostale veze s drugim dijelovima postrojenja važne za funkciju postrojenja prikazuju se simbolima.
- Olakšano projektiranje i analiza složenih upravljačkih sklopova radi jasnog prikaza djelovanja sklopa.
- Jednopolno prikazivanje cijelog glavnog strujnog kruga, ako se time ne smanjuju zahtjevi za strujne sheme.

Strujna shema s tehničkim podacima o elementima koji se na njoj nalaze prikazana je slikom 13.



Slika 13. Strujna shema i tehnički podaci elemenata [3]

### 3) Nadomjesna shema

- Pojednostavljeni prikazi strujnih krugova.
- Pružaju podatke na temelju kojih se može provoditi analiza.

### 4) Dijagram toka

- Prikazuje slijed i međusobne odnose pojedinih operacija, primjerice u računalnom programu.
- Tok snage u NEPLAN modelu.

### 5) Vremenski dijagram

- Prikazuje promjenu signala ili stanja pojedinih uređaja ili sklopova u vremenu.

Podjela prema načinu prikazivanja vodiča:

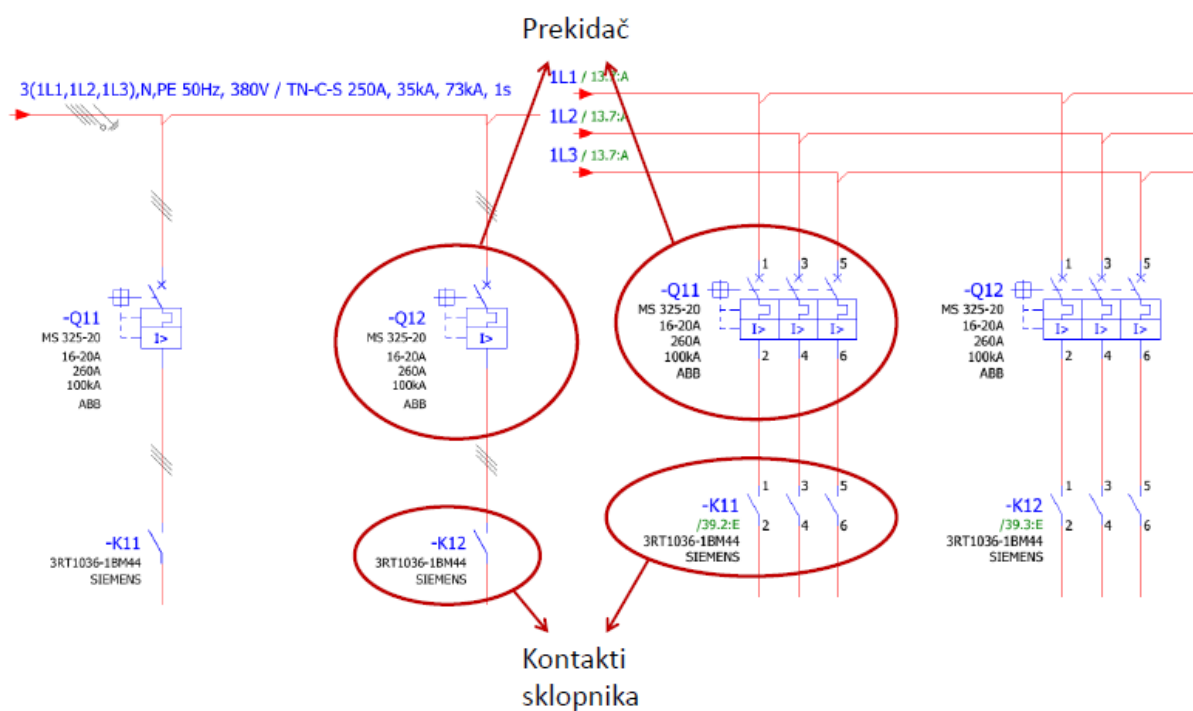
a) Jednopolni prikaz

- Električne veze dva ili više voda nadomještene su jednom linijom.
- Više jednakih elemenata može se predložiti jednim simbolom.
- Koristi se za prikazivanje vodiča višefaznog sustava, vodiča slične električne funkcije, paralelnih vodiča, vodiča koji imaju istu fizičku trasu ili isti prostorni smještaj na shemi.

b) Višepolni prikaz

- Svaki vodič prikazan je posebnom crtom.
- Svaki element prikazan je jednim simbolom.

Na slici 14. prikazana je strujna shema s jednopolnim (lijevo) i trolnim (desno) prikazom. Na shemi su istaknuti prekidač i sklopnik.



Slika 14. Jednopolni i trolni prikaz [2]

### 3. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA ENERGETSKOG SUSTAVA OTOKA MLJETA

U ovom poglavlju pokazat će se prethodni proračuni i simulacije energetske sustava otoka Mljeta. Cilj tih proračuna bio je pokazati mogućnost integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav otoka Mljeta te zadovoljavanje svih energetske potreba iz obnovljivih izvora [4]. Proračun je rađen u H<sub>2</sub>RES modelu za energetske planiranje otoka. H<sub>2</sub>RES model omogućuje analizu satne potrošnje električne energije, vode i vodika te potencijal energije iz vjetra, sunca i rijeka. H<sub>2</sub>RES solarni modul pretvara srednju satnu vrijednost dozračene energije na horizontalnu površinu u energiju dozračenu na kosu površinu te zatim u izlaznu snagu fotonaponske elektrane.

#### 3.1. Solarni modul

Srednje vrijednosti satne energije sunčeva zračenja mjere se na meteorološkim stanicama ili se izračunavaju za željenu geografsku širinu pomoću različitih modela. Podaci dobiveni mjerenjem na meteorološkoj stanici najčešće predstavljaju ukupno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu te ih je potrebno prilagoditi s obzirom na nagib PV modula. Kako bi se odredilo ukupno sunčevo zračenje na kosu površinu potrebno je odrediti faktor prilagodbe koji se može odrediti PV-GIS modelom. Za izračunavanje ukupnog, satnog, izlaznog električnog potencijala PV panela  $E_{PV,pot}^n$  potrebno je poznavati podatke o učinkovitosti panela koji se dobivaju od proizvođača [4].

Električni potencijal PV panela za  $n$ -ti sat:

$$E_{PV,pot}^n = \chi_m \mu_{PV} E_{PV,mjer}^n \quad (1)$$

Gdje je  $E_{PV,mjer}^n$  mjereno ukupno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu,  $\mu_{PV}$  ukupna učinkovitost panela,  $\chi_m$  je faktor pretvorbe ukupnog sunčevog zračenja na horizontalnu površinu u ukupno sunčevo zračenje na kosu površinu za mjesec  $m$ .

Ukupna učinkovitost PV modula:

$$\mu_{PV} = \mu_{PV,mod} \mu_{PV,con} \mu_{PV,los} \quad (2)$$

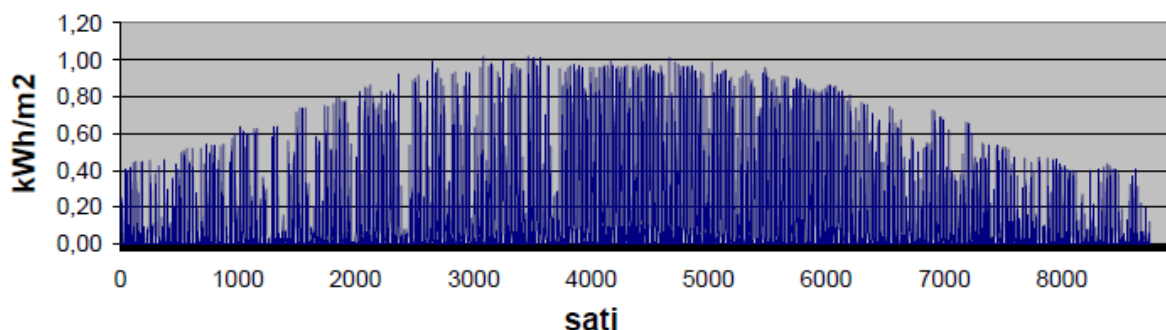
gdje je  $\mu_{PV,mod}$  učinkovitost modula,  $\mu_{PV,con}$  učinkovitost DC/AC konvertera i  $\mu_{PV,los}$  koeficijent gubitaka.

### 3.1.1. Podaci o sunčevom zračenju za otok Mljet

Podaci o srednjem, satnom, ukupnom sunčevom zračenju na horizontalnu površinu za otok Mljet dobiveni se mjerenjem na meteorološkoj postaji Dubrovnik te su uneseni u H<sub>2</sub>RES model. Kako bi se iz tih podataka izračunao električni potencijal PV panela na kosu površinu prema jednadžbi (1) potreban je pretvorbeni faktor  $\chi_m$  koji se može odrediti prema tablici 1. i ukupna učinkovitost PV modula koje se izračunava prema jednadžbi (2). U scenarijima je korištena ukupna učinkovitost PV modula  $\mu_{PV}=0,578$ . Za optimalni kut nagiba PV panela za Mljet izračunata je vrijednost od 36°. Na slici 15. prikazano je srednje satno zračenje na horizontalnu površinu [4].

Tablica 1. Izračun pretvorbenog faktora  $\chi_m$  [4]

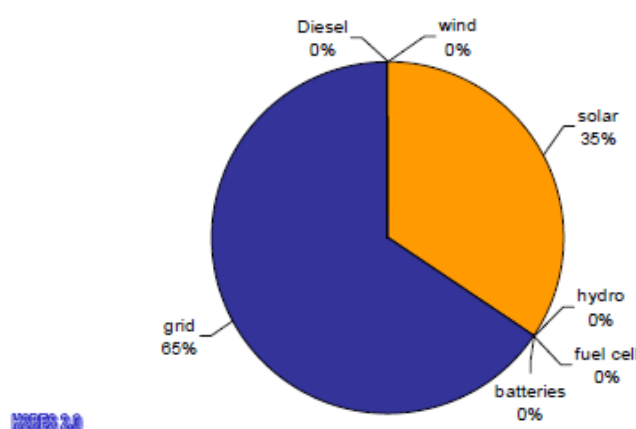
Mjesec $m$	$E_{PV,hor}$ -zračenje na horizontalnu površinu [kWh/m <sup>2</sup> /dan] PV-GIS	$E_{PV,tilt}$ -zračenje na 36° zakošenu površinu [kWh/m <sup>2</sup> /dan] PV-GIS	$\chi_m = \frac{E_{PV,tilt}}{E_{PV,hor}}$
1	1,737	3,038	1,749
2	2,527	3,799	1,503
3	3,874	4,944	1,276
4	5,218	5,724	1,097
5	6,389	6,269	0,981
6	6,946	6,459	0,930
7	7,38	7,053	0,956
8	6,424	6,794	1,058
9	4,969	6,168	1,241
10	3,324	4,872	1,466
11	2,029	3,44	1,695
12	1,517	2,762	1,821



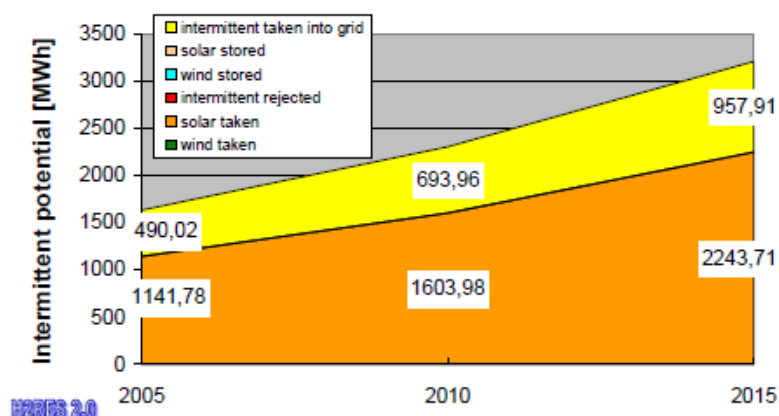
Slika 15. Srednje satno sunčevo zračenje na horizontalnu površinu [4]

### 3.2. Analiza rezultata scenarija

Scenariji su računati za 2005., 2010. i 2015. godinu. Analizirat će se scenarij Sunce 100%. U ovom scenariju nema ograničenja na udio električne energije iz obnovljive sunčeve energije pa je dozvoljena maksimalna penetracija električne energije iz PV panela, a dio isporučene električne energije izvan otoka iznosi oko 30% od ukupnog godišnjeg potencijala intermitentnih izvora. Uz zadane uvjete postiglo se da se električnom energijom iz PV panela zadovolji 35% godišnje potrošnje (slika 16). Na slici 17. prikazano je korištenje energije iz PV panela za pokrivanje potrošnje na otoku (solar taken) i koliko se energije izveze u električnu mrežu iz otoka (intermittent taken into grid) te bi se u 2015. izvezlo 2243 MWh.



Slika 16. Pokrivanje potrošnje u 2005. u Sunce 100% scenariju [4]



Slika 17. Korištenje godišnjeg potencijala intermitentnih izvora u Sunce 100% scenariju [4]



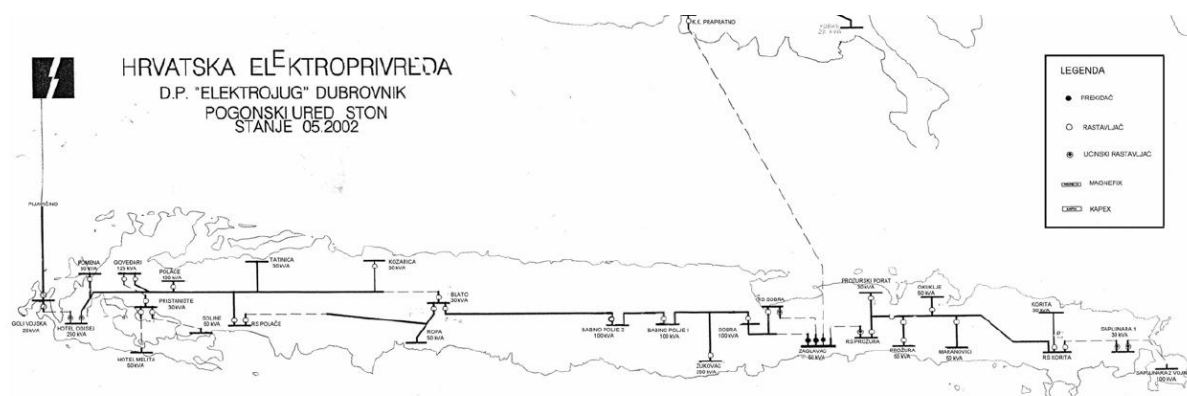
#### 4. ELEKTROENERGETSKI SUSTAV OTOKA MLJETA

Distribucijska mreža otoka Mljeta izvedena je na naponskim razinama od 10 i 0,4 kV te je povezana s elektroenergetskim sustavom kopnenog dijela Hrvatske pomoću dva podmorska kabela koji spajaju EES Mljeta s EES Pelješca. Prvi kabel tipa FXBTv 3x1x150 Cu spaja Dingač na Pelješcu s Goli vojskom na Mljetu, a drugi kabel tipa PP41 3x25 Cu spaja Prapratno na Pelješcu s Zaglavcem na otoku Mljetu. Maksimalna električna snaga koju mogu podnijeti kablovi:

$$P_{k,max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{k,max} \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

gdje je  $U$  napon podmorskih kabela [kV],  $I_{k,max}$  maksimalna jakost električne struje koju mogu podnijeti kabeli [A],  $\cos\varphi$  faktor električne snage.

Na slici 18. prikazana je shema elektroenergetskog sustava otoka Mljeta u 2002. godini. Prikazane su trafostanice, podmorski kabeli, prekidači, rastavljači i glavni nadzemni i podzemni vodovi. Elektroenergetska mreža u vlasništvu je Hrvatske elektroprivrede, a operator distribucijskog sustava područja je Elektrojug. U sustavu se nalaze 24 trafostanice od kojih je 10 TS na području nacionalnog parka Mljet.



**Slika 18. Elektroenergetski sustav otoka Mljeta [5]**

U tablici 2. prikazani su tehnički podaci za trafostanice na području NP Mljet u 2002. i 2015. godini. Uočljivo je kako su u 2015. snage trafostanica znatno povećane, a razlog je sve veća potrošnja električne energije.

**Tablica 2. Usporedba stanja TS na području NP Mljet [5]**

Redni Broj	TS	Stanje 2002. (kVA)	Stanje 2015. (kVA)
1	Goli Vojska	20	125
2	Hotel Odisej	250	400
3	Pomena	50	250
4	Govedari	125	125
5	Pristanište	30	160
6	Melita	50	50
7	Soline	50	50
8	Polače	100	250
9	Tatinica	30	50
10	Kozarica	30	250
	UKUPNO	735	1710

Za trafostanice izvan NP Mljet dostupni su podaci iz 2001. kako je prikazano u tablici 3.

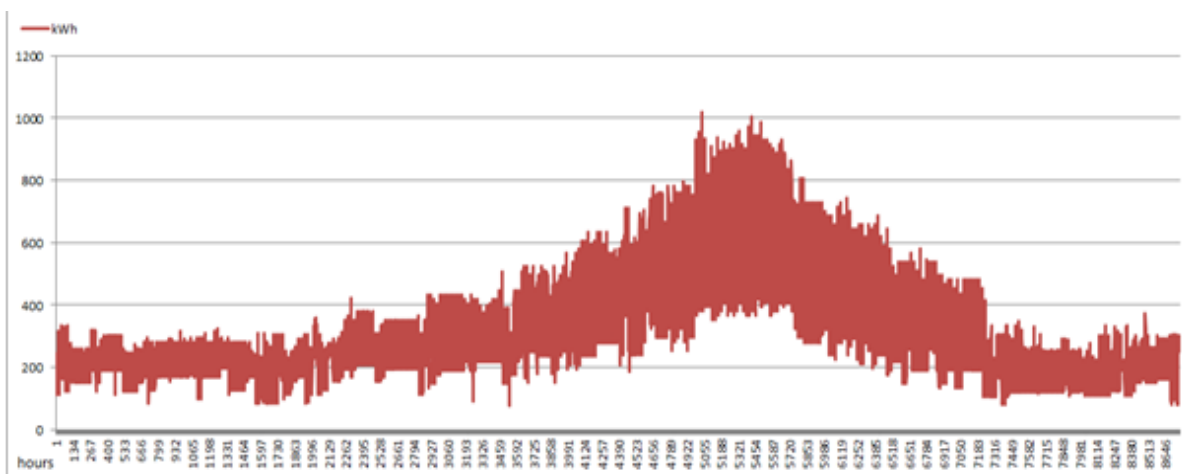
**Tablica 3. Trafostanice izvan NP Mljet [5]**

Redni broj	TS	Stanje 2001. (kVA)
11	Blato	30
12	Ropa	50
13	Babino Polje 2	100
14	Babino Polje 1	100
15	Žukovac	250
16	Sobra	100
17	Zaglavac	50
18	Prožurski Porat	50
19	Prožura	50
20	Okuklje	50
21	Maranovići	50
22	Korita	30
23	Saplunara 1	30
24	Saplunara 2 Vojna	100

Ukupna instalirana prividna snaga iznosi 2750 kVA, a uz faktor snage  $\cos\varphi=0,95$  radna instalirana snaga je 2612,5 kW. Od toga je na području NP mljeta instalirano 1710 kVA tj. 1624,5 kW.

#### 4.1. Potrošnja električne energije otoka Mljeta

Podaci o ukupnoj potrošnji električne energije za cijeli otok dostupni su za 2002. godinu. te su objavljeni u diplomskom radu [4]. Na slici 19. prikazana je godišnja potrošnja električne energije, iz krivulje vidimo veliku razliku između zimskog i ljetnog perioda. Razlog povećane potrošnje ljeti posljedica je velikog broja turista te potrošnja u odnosu za zimski dio godine raste do 65%. U tablici 4. prikazani su statistički podaci o potrošnji električne energije u 2002.



Slika 19. Godišnja potrošnja električne energije 2002. [4]

Tablica 4. Statistički podaci o potrošnji električne energije 2002. [4]

Ukupna potrošnja (MWh)	2696
Maksimalna potrošnja u satu (kWh)	1018
Minimalna potrošnja u satu (kWh)	79
Prosječna godišnja satna potrošnja (kWh)	307
Prosječna satna potrošnja za period 01.06.-01.09. (kWh)	504
Minimalna potrošnja u satu za period 01.06.-01.09. (kWh)	184

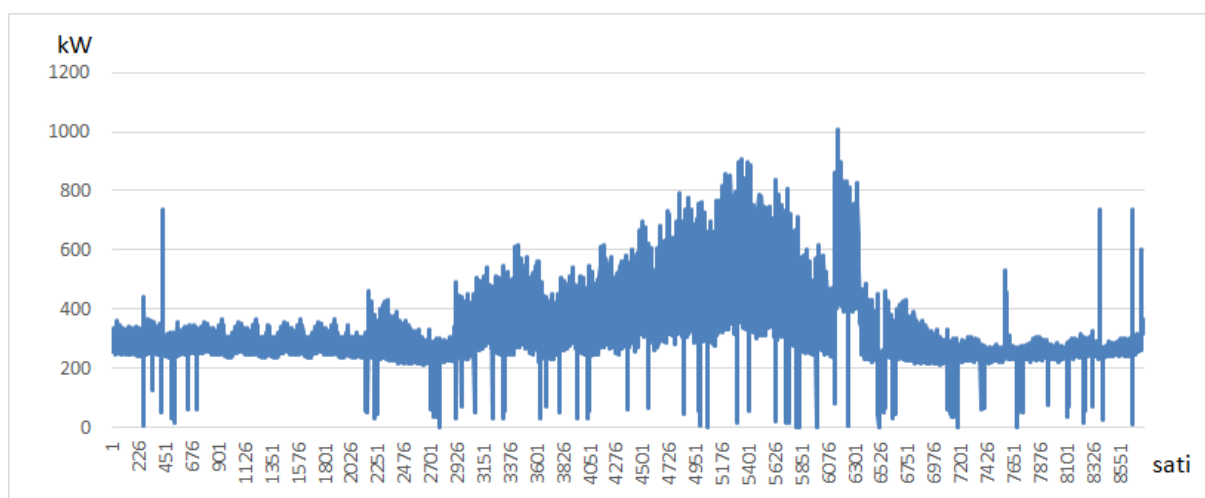
Za potrebe studije mreže [5] s ciljem integracije obnovljivih izvora energije napravljena su dodatna mjerenja u 2015. na 10 kV izvodu Pijavičino za Mljet iz TS 35/10 kV Pijavičino. Ovi podaci ne pokazuju potrošnju električne energije za cijeli otok, već daju novije i detaljnije podatke za područje NP Mljet. Rezultati su prikupljeni u obliku satnih minimalnih i maksimalnih vrijednosti struje u amperima za tri faze na podmorskom kabelu Pijavičino čiji je nazivni napon 10 kV.

Ukupna trofazna snaga je:

$$P_{3f} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

gdje je  $U_L$  linijski napon, a  $I_L$  linijska struja.

Srednje satne vrijednosti potrebne za analizu dobivene su aritmetičkom sredinom minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Za  $\cos\varphi$  odabrana je srednja vrijednost 0,85. Na slici 20. prikazana je potrošnja zapadnog djela otoka (NP Mljet). Ukupna potrošnja se određuje zbrajanjem satnih potrošnja koje su dobivene iz jednadžbe (4) gdje su struje dobivene mjerenjem. U tablici 5. prikazani su podaci o potrošnji za 2015. godinu za zapadni dio otoka.

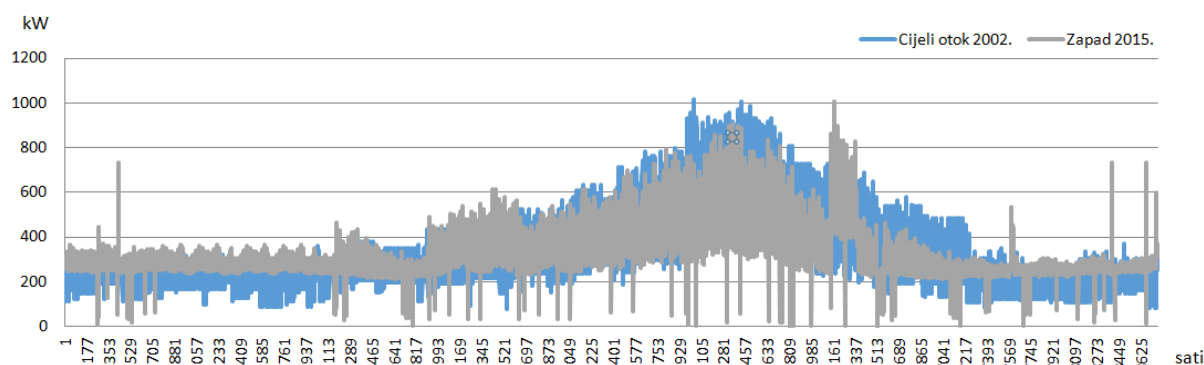


**Slika 20. Ukupna potrošnja električne energije za zapadni dio otoka u kWh 2015.**

**Tablica 5. Statistički podaci o potrošnji električne energije 2015. [5]**

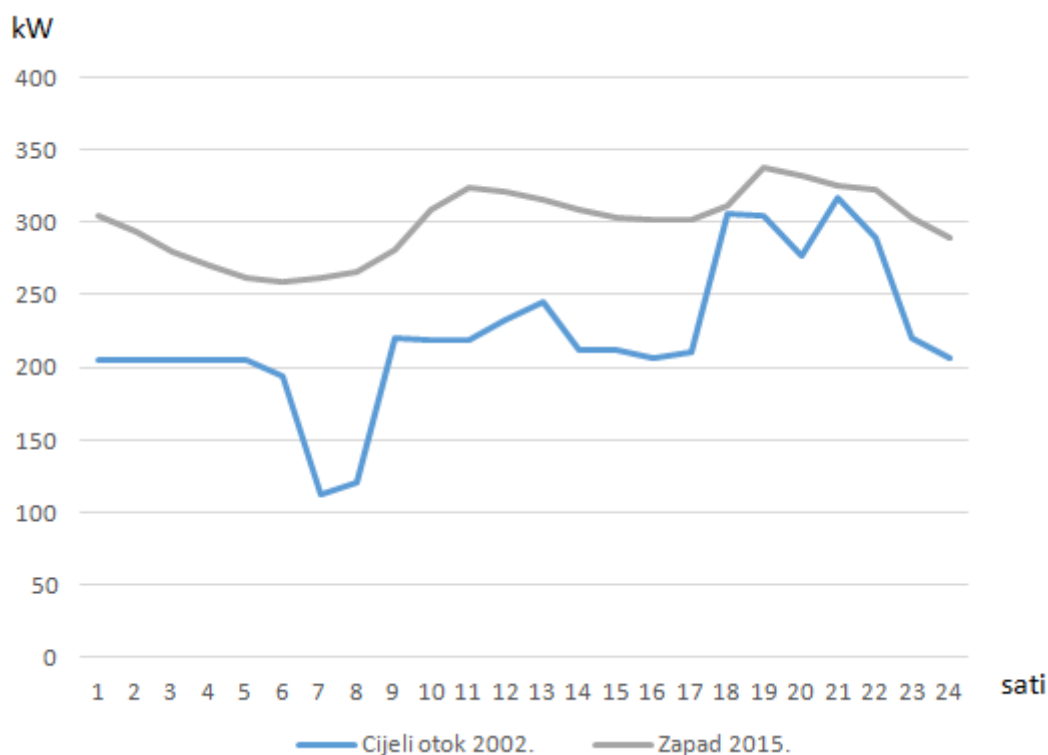
Ukupna potrošnja (MWh)	2987
Maksimalna potrošnja u satu (kWh)	1007
Minimalna potrošnja u satu (kWh)	Nije snimljena vrijednost
Prosječna satna potrošnja (kWh)	341

Usporedba potrošnje za oba slučaja prikazana je u zajedničkom dijagramu na slici 21. Krivulje su slične, ali treba uzeti u obzir da plava krivulja prikazuje ukupnu potrošnju cijelog otoka u 2002., a zelena krivulja prikazuje potrošnju električne energije za zapadni dio otoka (NP Mljet) u 2015. godini. Ukupna potrošnja u 2012. godini iznosila je 4239 MWh, prema [6].



**Slika 21. Usporedba ukupne godišnje potrošnje**

Usporedbom potrošnje zapadnog dijela iz 2015. s potrošnjom ukupnog otoka u 2002. može se zaključiti da je u 2015. godini potrošnja znatno veća jer je za manji zapadni dio ukupna potrošnja u iznosu od 2987 MWh za 2015. veća u odnosu na ukupnu potrošnju od 2696 MWh iz 2002. Na slici 22. prikazano je opterećenje u 24 sata za zapadni dio otoka 2015. i za cijeli otok 2002. Može se zaključiti da je opterećenje na zapadnom dijelu 2015. veće od opterećenja cijelog otoka 2002., ali odstupanja nisu jako izražena.



**Slika 22. Usporedba 24-satnog opterećenja**

#### 4.2. Mogućnost instalacije fotonaponskih elektrana i utjecaj na mrežu

Na otoku Mljetu postoji nekoliko lokacija na kojima je moguće instalirati fotonaponske elektrane. Primjerice na krovu hotela Odisej moguće je ukupno instalirati 260 kW, a to je otprilike 2 puta više od zbroja svih zgrada u vlasništvu JUNP Mljet. Postoji još nekoliko manjih zgrada na koje se mogu instalirati znatno manji PV paneli pa je jasno da hotel Odisej ima bitnu ulogu kod povećanja udjela električne energije iz obnovljivih izvora te bi uz predviđenu instaliranu snagu mogla zadovoljiti svoje potrebe za električnom energijom i za oko 70% povećao potencijalnu instaliranu snagu i proizvodnju, što se vidi iz tablice 6. U sklopu novoplaniranog ulaza Crna Klada u NP Mljet plan je izgraditi fotonaponsku elektranu instalirane snage barem 350 kW. Elektrana bi bila izvedena kao nadstrešnica parkirališta pa se tako ne bi zauzela dodatna prirodna površina.

**Tablica 6. Ukupna predviđena instalirana snaga fotonaponskih elektrana i godišnja proizvodnja [5]**

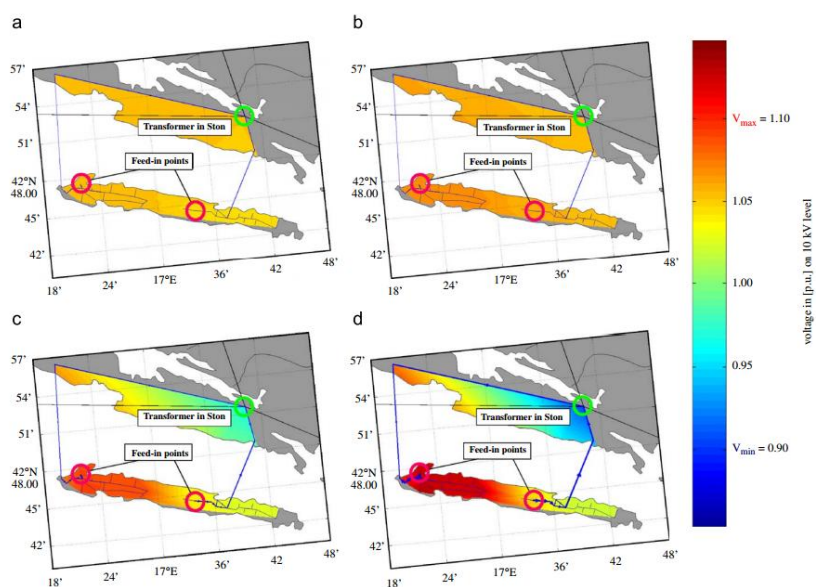
Lokacija	Instalirana snaga (kW)	Površina (m <sup>2</sup> )	Godišnja proizvodnja (MWh)
Goli 1	23	150	30,40
Goli 2	24	160	28,30
Pristanište 6	13	105	15,00
Pristanište 4	3,75	30	4,31
Pristanište 2	12,75	102	14,70
Vatrogasni dom	14	112	16,90
Hotel Odisej 1 i 2	260	2096	313,30
Ambulanta Vrbovica	13,25	106	15,50
<b>UKUPNO</b>	<b>363,75</b>	<b>2861</b>	<b>438,41</b>
<b>UKUPNO bez hotela Odisej</b>	<b>103,75</b>	<b>765</b>	<b>125,11</b>

Potencijal fotonaponskih elektrana prepoznat je u županijskoj i općinskoj upravi te se u mjerama predviđenim strateškim akcijskim planom učinkovitog gospodarenja energijom (SEAP) [6] nalazi između ostalog i plan općine Mljet da na svom području izgradi minimalno jednu fotonaponsku elektranu snage veće od 300 kW. Također će i NP Mljet promovirati ideju o gradnji FNE ili drugih OIE postrojenja. Predviđeni period provedbe je od 2015. do 2020. godine.

##### 4.2.1. Utjecaj na mrežu

Instalacija fotonaponskih elektrana snage do 1 MW s izvozom moguće je bez utjecaja na naponski nivo mreže te je u pojedinim dijelovima na zapadnoj strani zapravo poželjno radi stabilizacije napona. Međutim izvoz sa instalacijama većim od 1 MW pa do 2 MW nije

moću jer se u mreži javlja previsoki napon, veći od napona distribucijske mreže koji iznosi 10 kV. Na slici 23. prikazan je utjecaj instalacija FNE na naponski nivo mreže. Slučaj d (snaga veća od 1 MW) je najnepovoljniji zbog previsokog napona te takav slučaj nije moguć.




**Slika 23. Studija utjecaja instalacije FNE na otoku Mljetu na naponski nivo distribucijske mreže [5]**

## 5. PRORAČUN U EnergyPLAN-u

EnergyPLAN je računalni model koji omogućuju detaljnu analizu energetskeg sustava na satnoj bazi. U model je uključen proračun elektroenergetskog sektora, sektora grijanja i hlađenja, industrijskog sektora i transporta. Model ima široku primjenu diljem Svijeta [7].

EnergyPLAN se u ovom radu koristi za proračun proizvodnje iz fotonaponskih elektrana uz uvjet 5% kritičnog viška proizvodnje električne energije u zatvorenom energetskeg sustavu otoka Mljeta. Pošto je energetskeg sustav zadan kao zatvoren to znači da se sve potrebe za električnom energijom pokrivaju iz vlastitih izvora energije, u ovom primjeru su to fotonaponske elektrane. Dio proizvedene električne energije, tzv. „kritični višak“ (CEEP) se ili šalje u elektroenergetski sustav na kopnu ili se može skladištiti.

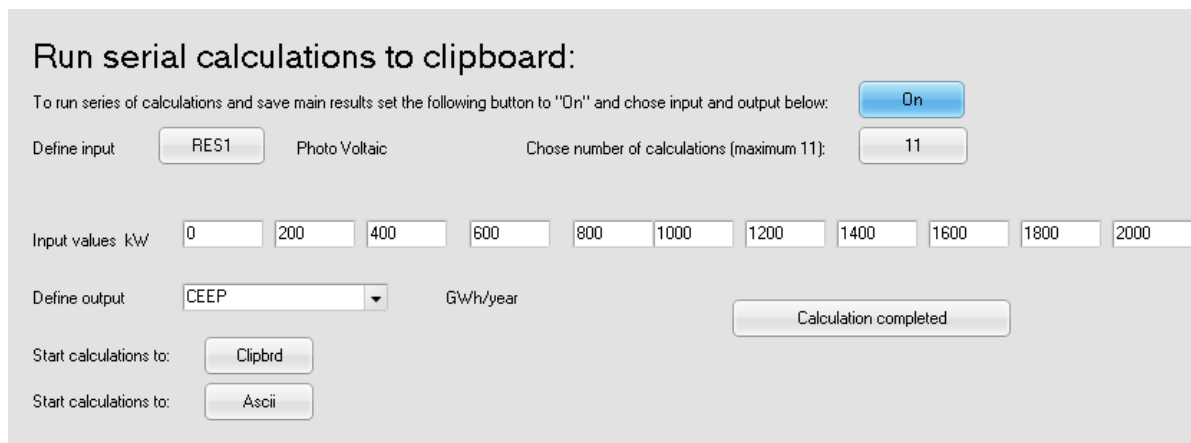
Ulazni podaci koji se koriste za proračun su ukupna potrošnja električne energije u 2015. za zapadni dio otoka (slika 20.) i podaci o učinkovitosti PV panela za otok Mljet. Proračun je napravljen za zapadnu stranu otoka u 2015. godini jer je za taj dio otoka poznata krivulja potrošnje. Potrošnja električne energije unosi se u EnergyPLAN kao distribucijska krivulja. Zahtjev za električnom energijom jednak je ukupnoj potrošnji zapadne strane otoka u 2015. te iznosi 2,987 GWh, a 5% od te vrijednosti zapravo je „kritični višak proizvodnje električne energije“ i on iznosi 0,15 GWh godišnje. Na slici 24. prikazani su rezultati dobiveni EnergyPLAN modelom.

Input										mjet proracun 5_CEEP_2015.txt										The EnergyPLAN model 12.0																																																	
Electricity demand (GWh/year): Fixed demand 2.99 Electric heating + HP 0.00 Electric cooling 0.00 Total 2.99										Flexible demand 0.00 Fixed imp/exp. 0.00 Transportation 0.00 2.99										Capacities kW-e kJ/s Group 2: CHP 0 Heat Pump 0 Boiler 0 Group 3: CHP 0 Heat Pump 0 Boiler 0 Condensing 0										Efficiencies elec. Ther. COP 0.40 0.50 0.90 0.40 0.50 0.90 0.45										Regulation Strategy: Technical regulation no. 1 KEOL regulation 00000000 Minimum Stabilisation share 0.00 Stabilisation share of CHP 0.00 Minimum CHP gr 3 load 0 kW Minimum PP 0 kW Heat Pump maximum share 0.50 Maximum import/export 0 kW										Fuel Price level: Capacities Storage Efficiencies kW-e MWh elec. Ther. Hydro Pump: 0 0 0.80 Hydro Turbine: 0 0 0.90 Electrol. Gr.2: 0 0 0.80 0.10 Electrol. Gr.3: 0 0 0.80 0.10 Electrol. trans.: 0 0 0.80 Ely. MicroCHP: 0 0 0.80 CAES fuel ratio: 0.000																			
District heating (GWh/year) District heating demand 0.00 Solar Thermal 0.00 Industrial CHP (CSHP) 0.00 Demand after solar and CSHP 0.00										Gr.1 Gr.2 Gr.3 Sum 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00										Grid stabilisation share 0.00 0.00 0.00 0.00										Heatstorage: gr.2: 0 MWh Fixed Boiler: gr.2: 0.0 Per cent gr.3: 0 MWh gr.3: 0.0 Per cent										Dist. Name : hour_PV_eltra2001.txt Addition factor 0.00 HRK/MWh Multiplication factor 2.00 Dependency factor 0.00 HRK/MWh pr. MW Average Market Price 0 HRK/MWh Gas Storage 0 MWh Syngas capacity 0 kW Biogas max to grid 0 kW										(GWh/year) Coal Oil Ngas Biomass Transport 0.00 0.00 0.00 0.00 Household 0.00 0.00 0.00 0.00 Industry 0.00 0.00 0.00 0.00 Various 0.00 0.00 0.00 0.00																			
Photo Voltaic 870 kW Photo Voltaic 0 kW Wave Power 0 kW River Hydro 0 kW Hydro Power 0 kW Geothermal/Nuclear 0 kW										1.06 GWh/year 0 GWh/year 0 GWh/year 0 GWh/year 0 GWh/year 0 GWh/year										Grid stabilisation share 0.00 0.00 0.00 0.00										Electricity prod. from CSHP Waste (GWh/year) Gr.1: 0.00 0.00 Gr.2: 0.00 0.00 Gr.3: 0.00 0.00										0 MWh 0.0 Per cent 0 MWh 0.0 Per cent										0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00										0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00									
Output																														WARNING!!!: (1) Critical Excess; (3) PP/Import problem																																							
District Heating															Electricity															Exchange																																							
Demand										Production										Consumption										Production										Balance					Payment																								
Distr. heating kW	Solar kW	Waste+ CSHP kW	DHP kW	CHP kW	HP kW	ELT kW	Boiler kW	EH kW	Bal-ance kW	Elec. demand kW	Flex.& Transp. kW	HP kW	Electro-lyser kW	EH kW	Hydro Pump kW	Tur-bine kW	RES kW	Hy-dro thermal kW	Geo-thermal kW	Waste+ CSHP kW	CHP kW	PP kW	Stab-Load %	Imp kW	Exp kW	CEEP kW	EEP kW	Imp 1000 HRK	Exp																																								
January	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	100	226	13	13	0	0																																								
February	0	0	0	0	0	0	0	0	0	281	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	100	216	19	19	0	0																																								
March	0	0	0	0	0	0	0	0	0	278	0	0	0	0	0	0	114	0	0	0	0	0	0	100	197	34	34	0	0																																								
April	0	0	0	0	0	0	0	0	0	271	0	0	0	0	0	0	118	0	0	0	0	0	0	100	185	32	32	0	0																																								
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	379	0	0	0	0	0	0	136	0	0	0	0	0	0	100	254	12	12	0	0																																								
June	0	0	0	0	0	0	0	0	0	385	0	0	0	0	0	0	158	0	0	0	0	0	0	100	235	9	9	0	0																																								
July	0	0	0	0	0	0	0	0	0	472	0	0	0	0	0	0	175	0	0	0	0	0	0	100	301	4	4	0	0																																								
August	0	0	0	0	0	0	0	0	0	520	0	0	0	0	0	0	168	0	0	0	0	0	0	100	353	2	2	0	0																																								
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	415	0	0	0	0	0	0	151	0	0	0	0	0	0	100	282	18	18	0	0																																								
October	0	0	0	0	0	0	0	0	0	271	0	0	0	0	0	0	122	0	0	0	0	0	0	100	178	29	29	0	0																																								
November	0	0	0	0	0	0	0	0	0	252	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0	100	190	22	22	0	0																																								
December	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	100	219	11	11	0	0																																								
Average	0	0	0	0	0	0	0	0	0	340	0	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	100	237	17	17	0	0																																								
Maximum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1004	0	0	0	0	0	0	650	0	0	0	0	0	0	100	1004	535	535	0	0																																								
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	1																																								
GWh/year	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.15	0.15	0.00	1000 HRK	0																																								

Slika 24. Proračun u EnergyPLAN-u



Kako bi se kontrolirala potrebna snaga PV panela koja će zadovoljiti navedene uvjete potrebno je u EnergyPLAN-u provesti serijsku analizu. Svrha je pokazati odnos kritičnog viška proizvodnje električne energije (CEEP) i snage PV panela te se za zadani CEEP od 5% odabire adekvatna snaga. Ulazni podatak je snaga PV panela u kW, a izlazni podatak je CEEP. Na slici 25. prikazana je serijska analiza u EnergyPLAN-u, a u tablici 7. rezultati te analize. Slikom 26. prikazana je ovisnost CEEP-a o snazi PV panela.



**Slika 25. Serijska analiza u EnergyPLAN-u**

**Tablica 7. Rezultati dobiveni serijskom analizom u EnergyPLAN-u**

Snaga [kW]	CEEP [GWh/god]	CEEP %
0	0	0%
200	0	0%
400	0,01	0%
600	0,03	1%
800	0,11	4%
1000	0,24	8%
1200	0,41	14%
1400	0,6	20%
1600	0,8	27%
1800	1,02	34%
2000	1,23	41%

Snaga PV panela može se odrediti linearnom interpolacijom iz tablice 7.:

$$P = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{CEEP_2 - CEEP_1} (CEEP - CEEP_1) \quad (5)$$

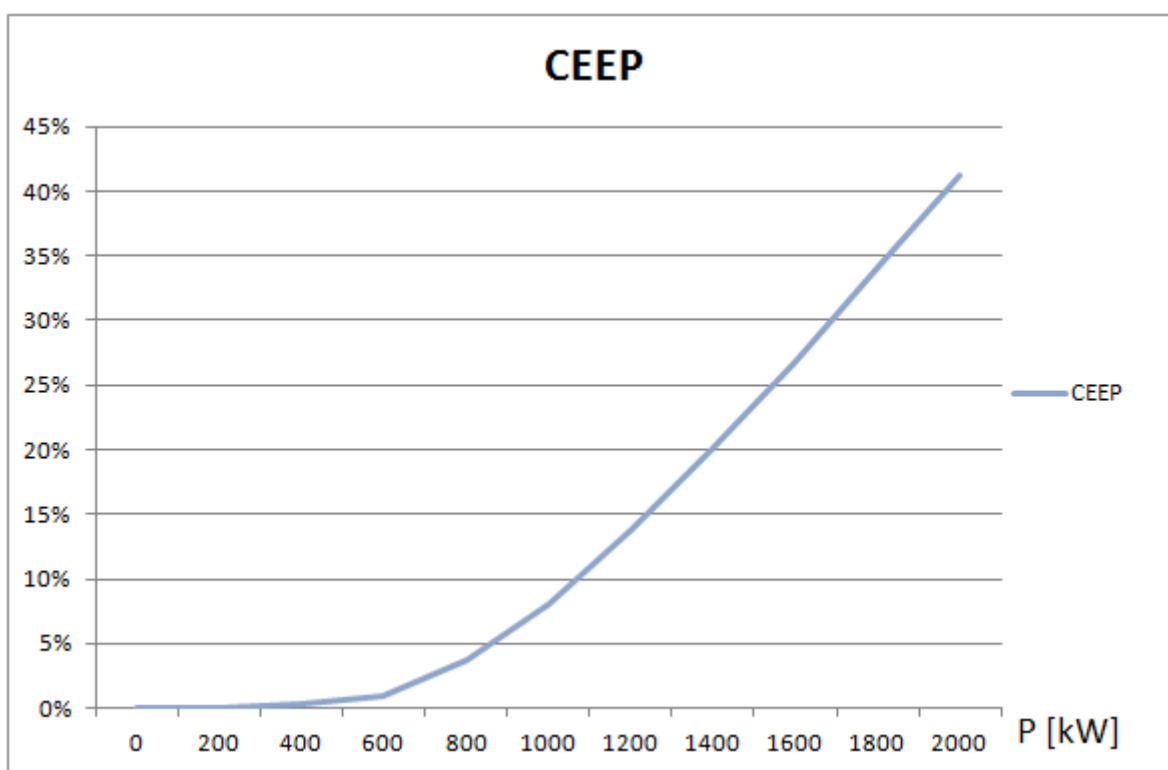
gdje je:

$$P_1 = 800 \text{ kW}, CEEP_1 = 4\%$$

$$P_2 = 1000 \text{ kW}, CEEP_2 = 8\%$$

$$CEEP = 5\%$$

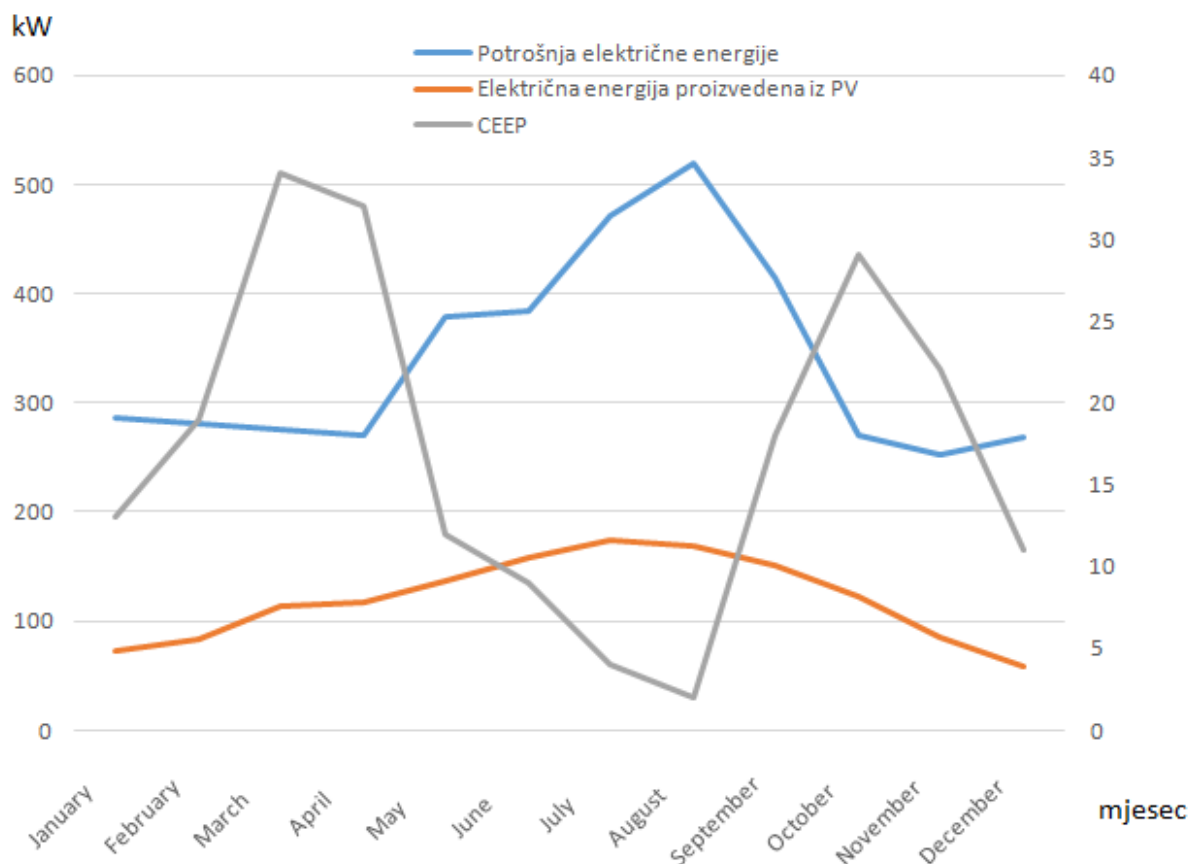
Za navedene vrijednosti dobiva se snaga  $P = 860,54 \text{ kW}$ , što približno odgovara snazi dobivenoj u EnergyPLAN-u od 870 kW.



Slika 26. Ovisnost CEEP-a o snazi

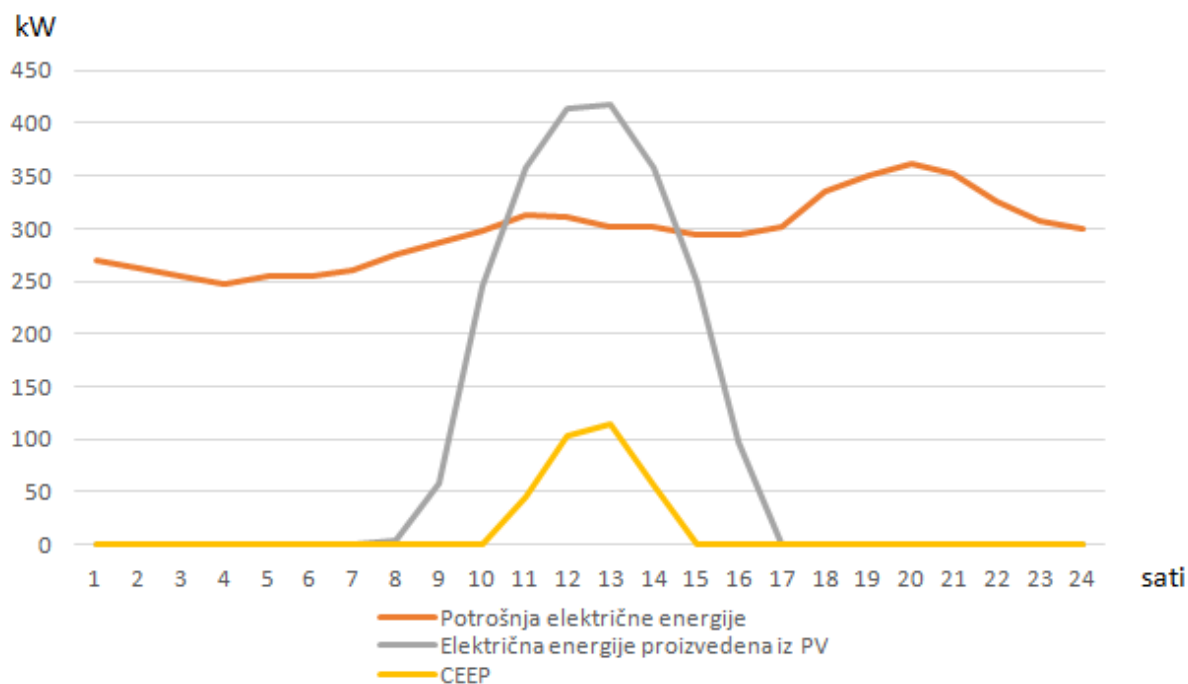
Slika 27. prikazuje prosječne mjesečne vrijednosti opterećenja (u kW) kod potrošnje električne energije, kod proizvodnje iz PV i „kritičnog viška“ proizvodnje električne energije (CEEP). Maksimalna vrijednost CEEP postiže se u ožujku i iznosi 34 kW, maksimalna vrijednost PV je 175 kW u srpnju, a maksimalna vrijednost opterećenja kod potrošnje je postignuta u kolovozu u iznosu od 520 kW. Razlog je velik broj turista te s time i veći broj noćenja.

Minimalna vrijednost CEEP postiže se u kolovozu i iznosi 2 kW, glavni razlog za tako mali CEEP je velika potrošnja u kolovozu. Može se zaključiti da u periodu u kojem je potrošnja smanjena postoji povećana mogućnost izvoza električne energije. Navedenim izvozom mogao bi se pokriti dio potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj te bi se time smanjio uvoz električne energije u Hrvatsku.



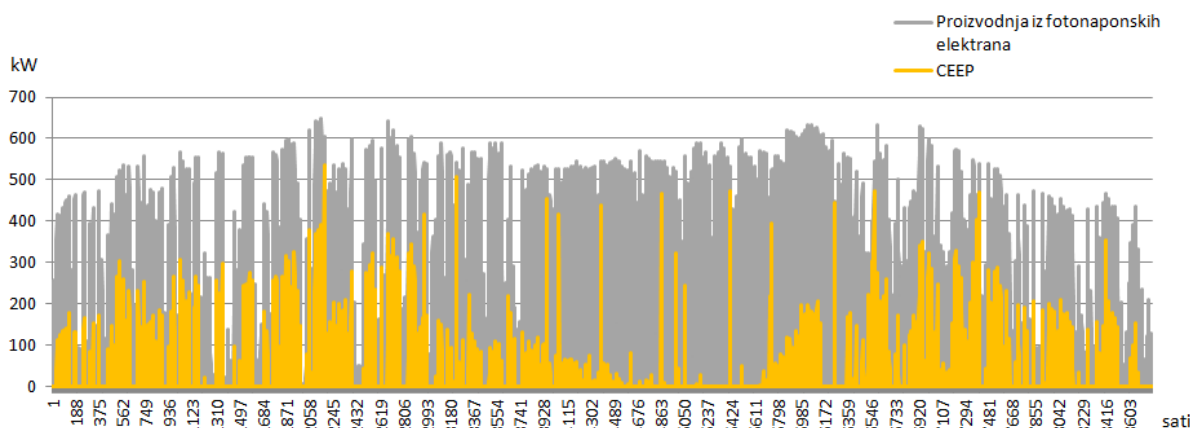
Slika 27. Prosječne mjesečne vrijednosti (kW)

Na slici 28. prikazane su satne vrijednosti opterećenja (kW). Iz dijagrama se može zaključiti da imamo „kritični višak proizvodnje električne energije“ u periodu od 10:00-15:00 sati, a to je period u kojem je postignuta najveća efikasnost PV. Maksimalne vrijednosti postižu se u 13:00 te iznose 417 kW za PV i 115 kW za CEEP.



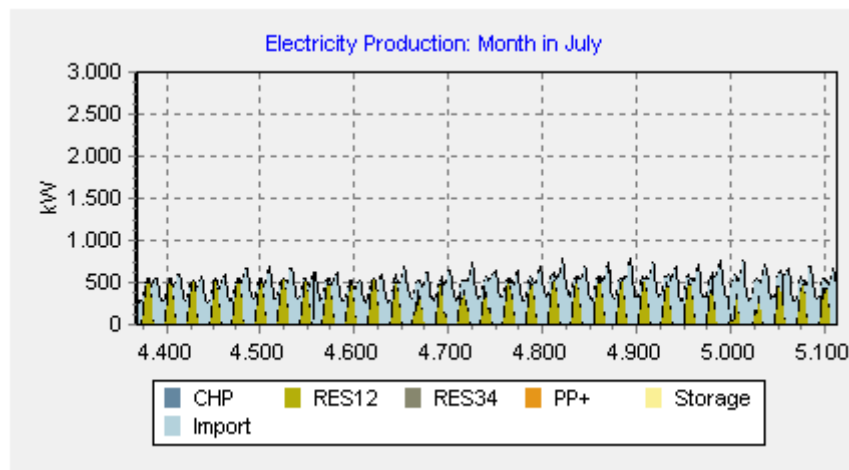
Slika 28. Satne vrijednosti (kW)

Godišnja proizvodnja iz fotonaponskih elektrana i godišnji „kritični višak proizvodnje električne energije“ (CEEP) prikazani su na slici 29. Ukupna proizvodnja iz FNE godišnje iznosi 1,06 GWh, a CEEP iznosi 0,15 GWh. Maksimalna proizvodnja iz FNE iznosi 650 kWh, a maksimalni „kritični višak proizvodnje električne energije“ je 535 kWh što je ujedno i maksimalna izvezena električna energija.

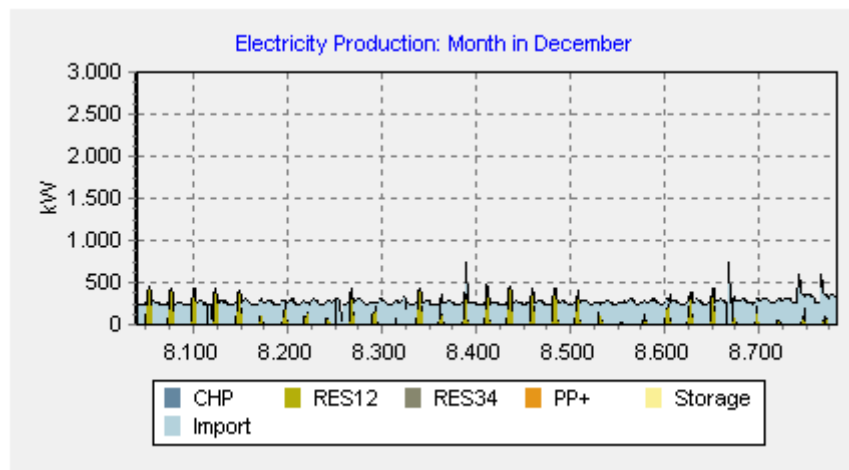


Slika 29. Godišnja proizvodnja iz FNE i godišnji CEEP u kWh

Slike 30. i 31. prikazuju proizvodnju električne energije iz fotonaponskih elektrana u srpnju, odnosno prosincu. Jasno da je u srpnju proizvodnja znatno veća nego u prosincu te je potreba za uvozom drastično smanjena. U srpnju je proizvodnja iz FNE jednaka 133,07 MWh, a u prosincu iznosi 44,1 MWh što znači da je u prosincu proizvodnja manja za 67% u odnosu na srpanj.



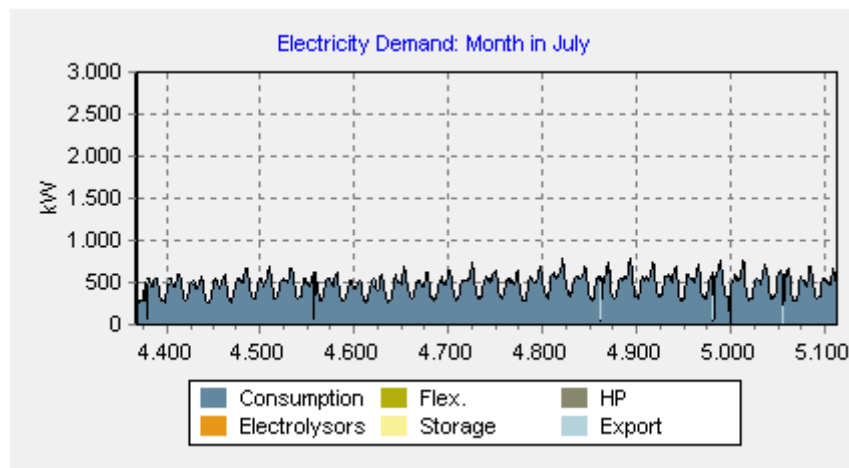
Slika 30. Proizvodnja električne energije u srpnju



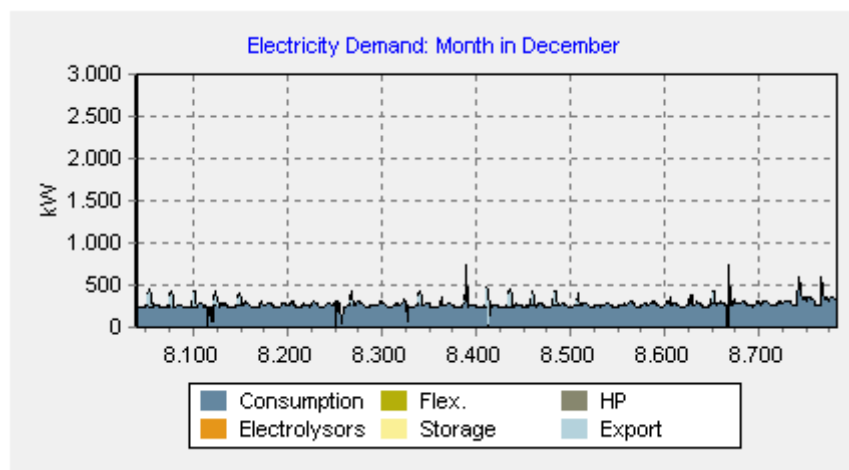
Slika 31. Proizvodnja električne energije u prosincu

Na slikama 32. i 33. prikazana je ukupna potrošnja električne energije u srpnju, odnosno prosincu. Potrošnja u srpnju je skoro dva puta veća od potrošnje u prosincu pa je jasno da instaliranjem PV panela možemo zadovoljiti veliki dio potrošnje u srpnju koja iznosi 355 MWh te se proizvodnjom iz FNE (slika 30.) pokriva 37,5%.

U prosincu je potrošnja 197 MWh što je 45% manje nego u srpnju, a proizvodnjom iz FNE u prosincu se pokriva samo 22%. Izvezena električna energija u srpnju iznosi 2,714 MWh što je ujedno „kritični višak proizvodnje električne energije“.

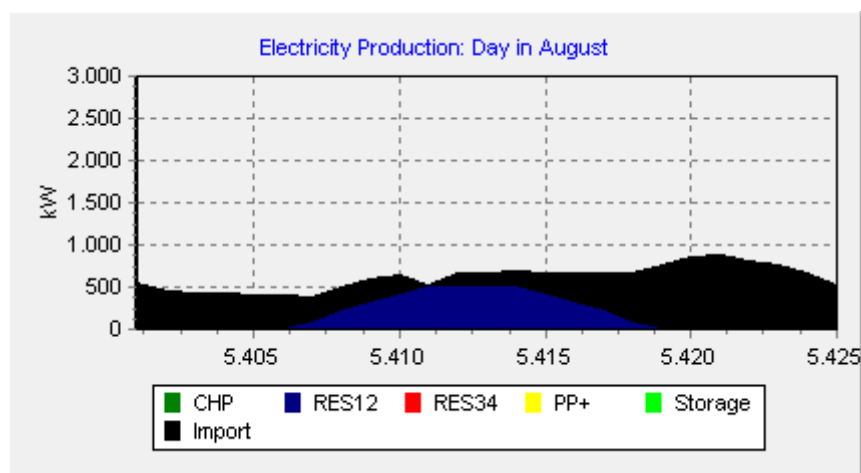


Slika 32. Potrošnja električne energije u srpnju

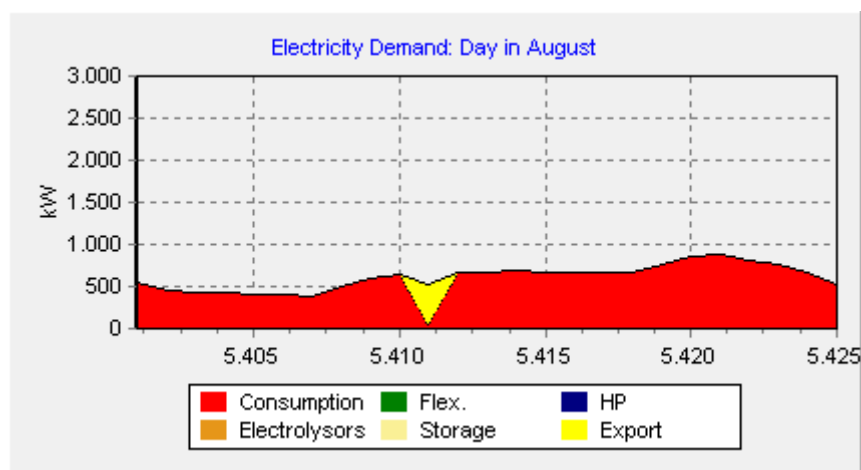


Slika 33. Potrošnja električne energije u prosincu

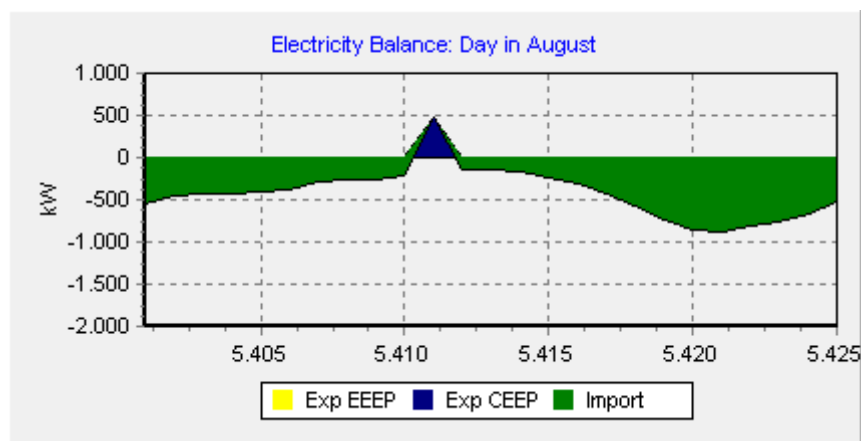
Na slici 34. je prikazana proizvodnja električne energije za jedan dan u kolovozu, ukupno je u tom danu proizvedeno 4,377 MWh električne energije. Nadalje na slici 35. potrošnja električne energije za jedan dan u kolovozu iznosi 15,426 MWh, a na slici 36. „kritični višak proizvodnje električne energije“ (CEEP) od 0,473 MWh. Usporedbom slika 35. i 36. može se uočiti da izvezena električna energija na slici 35. odgovara kritičnom višku na slici 36.



Slika 34. Proizvodnja električne energije za jedan dan u kolovozu

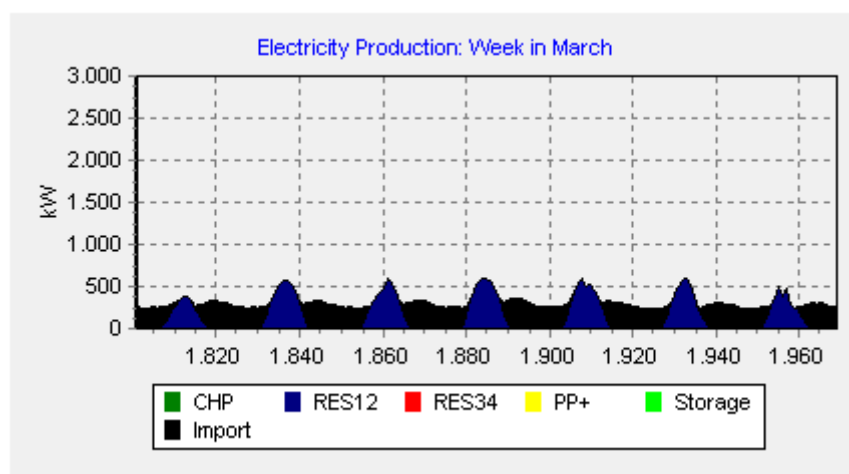


Slika 35. Potrošnja električne energije za jedan dan u kolovozu

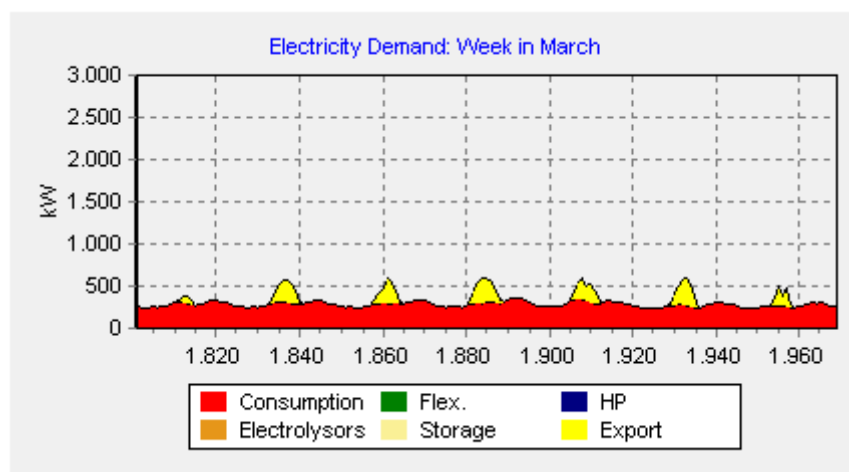


Slika 36. CEEP za jedan dan u kolovozu

Kako je prije spomenuto prosječna mjesečna maksimalna vrijednost CEEP postiže se u ožujku. Razlog je u nešto manjoj potrošnji koja u promatranom tjednu iznosi 48,023 MWh što prikazuje slika 38. pa se proizvodnjom iz FNE od 25,117 MWh koja je dovoljna za pokrivanje većeg dijela uvoza (slika 37.) postižu nešto veće vrijednosti CEEP te u promatranom tjednu ožujka iznosi 7,291 MWh (slika 39.). Na slici 39. vidi se kako je uvoz umanjen upravo za proizvodnju iz FNE prikazanu na slici 37. umanjenu za vrijednost CEEP. Iz navedenog slijedi da je uvoz umanjen za 17, 826 MWh.

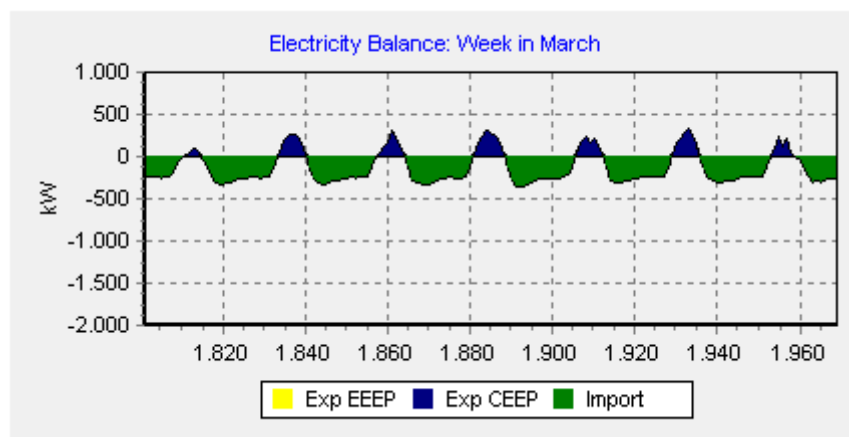


Slika 37. Proizvodnja električne energije u jednom tjednu ožujka



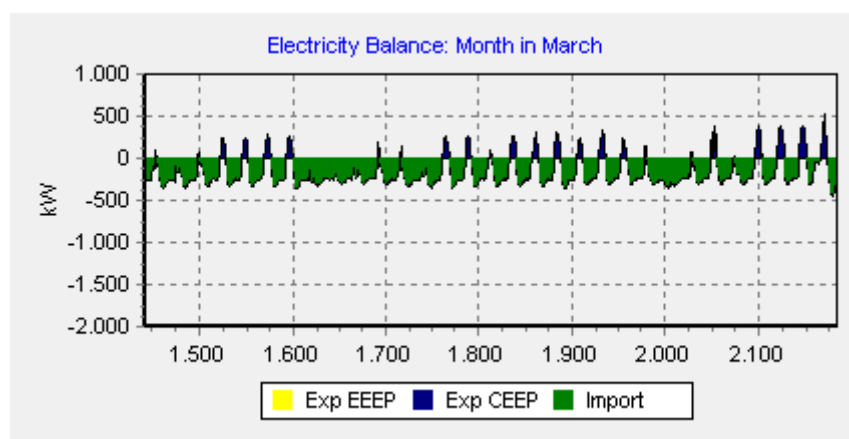
Slika 38. Potrošnja električne energije u jednom tjednu ožujka



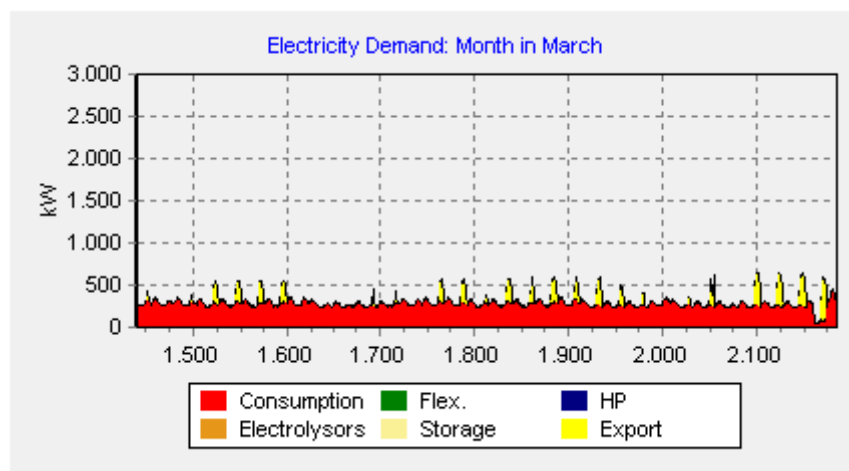


**Slika 39. CEEP u jednom tjednu ožujka**

Rezultati za cijeli ožujak isto tako pokazuju povećane vrijednosti CEEP (slika 40.) tj. izvoza električne energije (slika 41.) u iznosu od 23,159 MWh. Ukupna potrošnja u ožujku je 170,907 MWh, a proizvodnja iz FNE prema slici 42. iznosi 73, 13 MWh. Usporedbom navedenih vrijednosti s onima u srpnju (slike 30. i 32.) zaključuje se kako je u ožujku izvoz električne energije tj. CEEP veći u odnosu na srpanj za 20,445 MWh odnosno 88%. U ožujku je izvoz toliko veći zbog znatno manje potrošnje električne energije koja je manja za 184,093 MWh ili 52%.



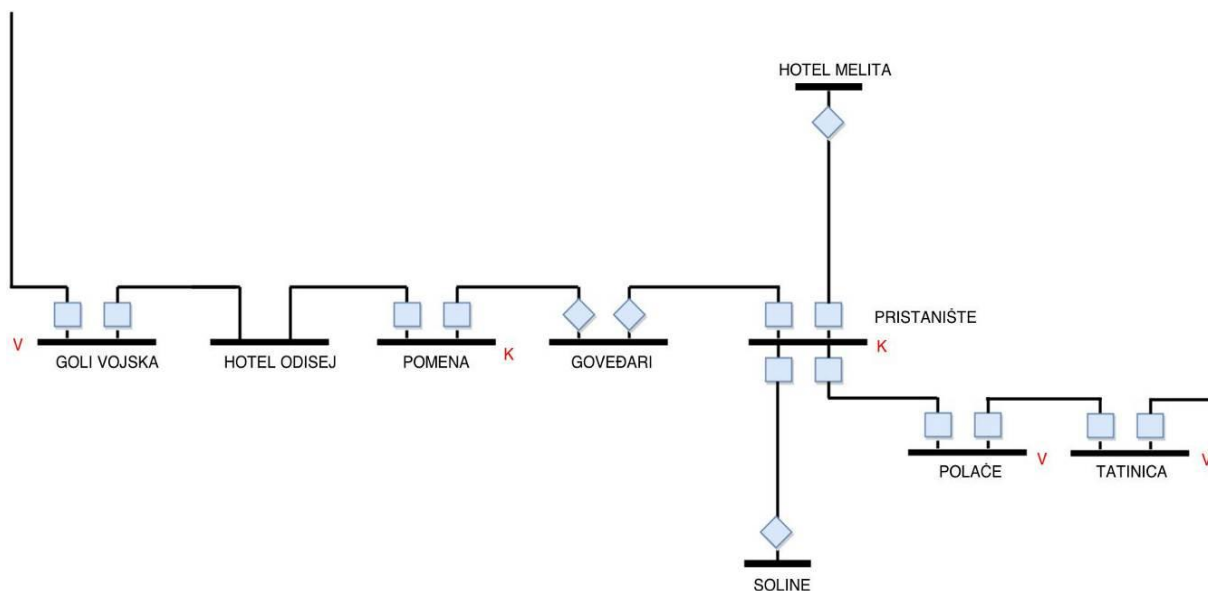
**Slika 40. CEEP u ožujku**



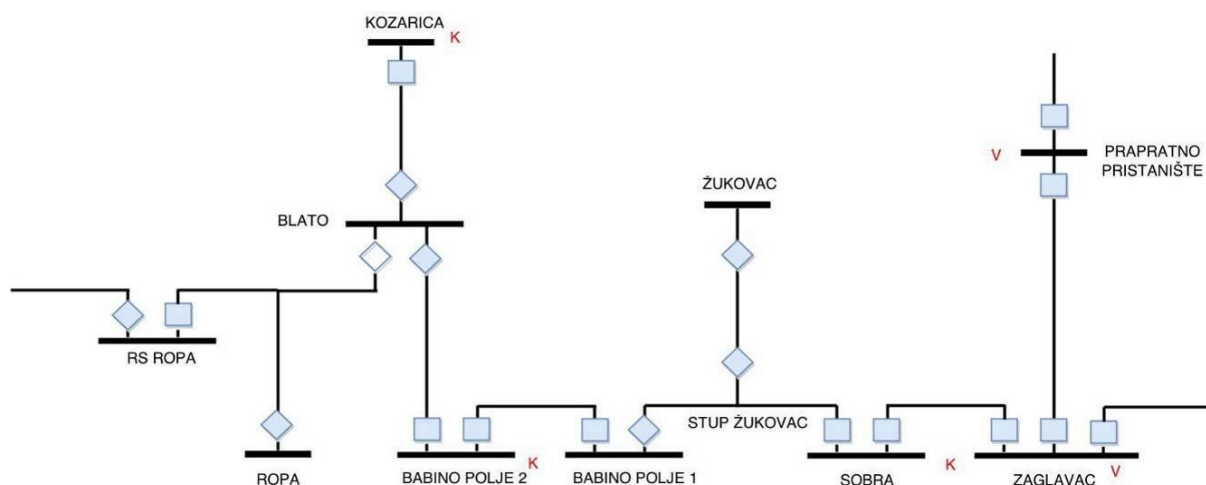
**Slika 41, Potrošnja električne energije u ožujku**

## 6. PRORAČUN U NEPLAN-u

Prije samog proračuna u NEPLAN alatu za energetske planiranje potrebno je nadopuniti shemu u NEPLAN-u iz 2002. godine. Shema iz 2002. prikazuje istočni dio otoka te se za nove podatke iz 2015. godine mora napraviti shema elektroenergetskog sustava cijelog otoka. Shema je napravljena prema SCADA (eng. Supervisory Control And Data Acquisition) ispisu jednopolne sheme elektroenergetskog sustava otoka Mljeta koji prikazuje realno stanje spojeva, pretvarača i prekidača. SCADA ispis dobiven je od HEP operatora distribucijskog sustava, pogon Elektrojug. SCADA ispis prikazan je na slikama 42. i 43. te prikazuje zapadni i središnji dio otoka do sabirnice Zaglavac gdje je spojen podmorski kabel koji povezuje EES Mljeta s EES Pelješa.



Slika 42. SCADA ispis za zapadni dio otoka [5]



**Slika 43. SCADA ispis za središnji dio otoka [5]**

Kako bi se analizirala integracija električne energije iz obnovljivih izvora u energetske sustav otoka Mljeta, u NEPLAN model se osim prikazanih rasklopnih postrojenja unosi dodatna transformatorska stanica koja je predviđena na lokaciji Crna Klada te se na nju spaja fotonaponska elektrana Crna Klada snage 350 kW. Uz navedenu elektranu, prema snazi dobivenoj iz EnergyPLAN modela od 870 kW, potrebno je još 520 kW fotonaponskih panela. Fotonaponske elektrane i njihove instalirane snage potrebne za proračun u NEPLAN modelu prikazane su u tablici 8.

**Tablica 8. Fotonaponske elektrane**

Fotonaponska elektrana	Instalirana snaga (kW)
Crna Klada	350
Hotel Odisej	260
Pomena	60
Polače	50
Goveđari	50
Soline	50
Pristanište	50
UKUPNO	870

## 6.1. Izrada sheme u NEPLAN modelu

Proces izrade sheme u NEPLAN modelu baziran je na principu crtanja vodova i njihovog spajanja čvorovima. NEPLAN omogućuje unos svih važnih parametara i podataka o tipu vodova, transformatorskih stanica i snage trošila te generatora. Na slici 44. prikazani su podaci o kabelu koje je potrebno unijeti, a tip kabela odabire se iz NEPLAN biblioteke. Za potrebe analize i proračuna podaci o kabelima (dimenzije, tip, duljina) su pretpostavljeni te bi samo unošenje stvarnih vrijednosti s terena te usporedba s mjerenjima mogla poslužiti validiranju modela.

**Parameters**

Name: L-kabel\_PIJAVIČINO-GOLI

Type: 10kV N2XSY 3x1x 25

Length .. km: 18

Units: Ohm/km

Number of lines: 1

EMT model: PI

R(1) .. Ohm/km: 0,711

R(0) .. Ohm/km: 1

X(1) .. Ohm/km: 0,149

X(0) .. Ohm/km: 1

C(1) .. uF/km: 0,202999

C(0) .. uF/km: 0,203

B(1) .. uS/km: 63,774

B(0) .. uS/km: 63,774

G(1) .. uS/km: 0

Ir max (low) .. A: 157

Ir max (med) .. A: 0

Ir max (high) .. A: 157

Reduction factor: 1

IEr max .. A: 0

☐ Asymmetric Pi with sections

☐ Switchable

Slika 44. Podaci o kabelu

Podaci o transformatoru transformatorske stanice prikazani su na slici 45., navedena transformatorska stanica transformira napon od 10 kV na 0,4 kV tj. sa srednjenaponske razine na niskonaponsku. Snaga transformatora je 400 kVA.

**Parameters**

Name: TR-HOTEL ODISEJ

Type: 8 EMTBN 400-24x/A

☒ 3-phase transformer ☐ 3 x 1-phase transformer

Un1 .. kV: 10 Un2 .. kV: 0,4 Sr .. MVA: 0,4

Ur1 .. kV: 10 Ur2 .. kV: 0,4

URr(1) .. %: 0,05 kW: 0,2 URr(0) .. %: 0,05 kW: 0,2

Ukr(1) .. %: 4 Ukr(0) .. %: 3,8

X(1)/R(1): 79,99 X(0)/R(0): 75,99

IO .. %: 3,5 U01(0) .. %: 0 LMUNS .. pu: 28,57142

P fe .. kW: 0 U02(0) .. %: 0 LMSAT .. pu: 0

On-load tapchanger ☐

Switchable ☐

Autotransformer ☐

phiresA .. pu: 0

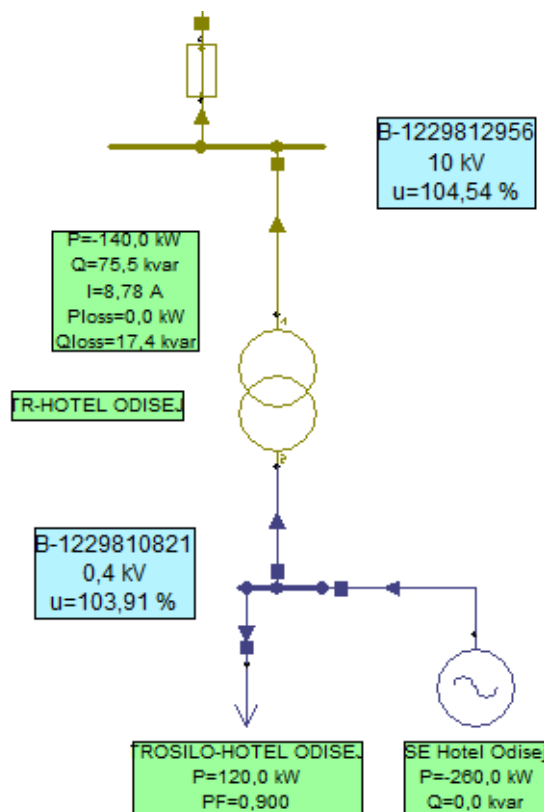
phiresB .. pu: 0

phiresC .. pu: 0

Vector Group: Dyn5

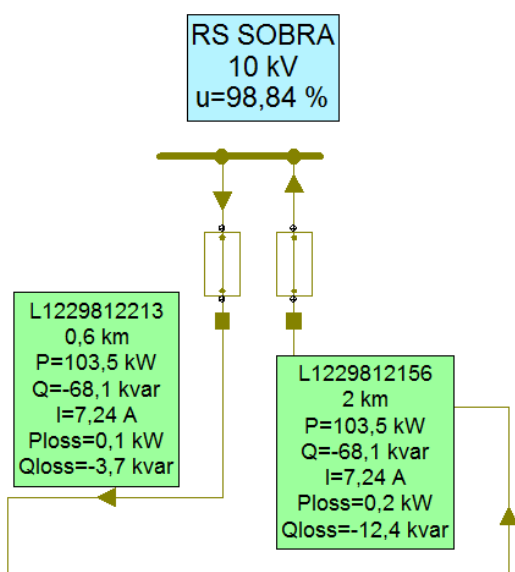
**Slika 45. Podaci o transformatoru**

Slika 46. prikazuje transformator s fotonaponskom elektranom koja predaje električnu energiju u sustav i trošilo koje uzima električnu energiju iz sustava. Na slici se mogu vidjeti i tokovi snaga te se vidi da se dijelom električne energije proizvedene u fotonaponskoj elektrani napaja trošilo, a dio se šalje u mrežu.



Slika 46. Prikaz transformatora, elektrane i trošila u NEPLAN-u

Slika 47. prikazuje sabirnicu koja povezuje vodove koji dovode i odvode električnu energiju.



Slika 47. Sabirnica

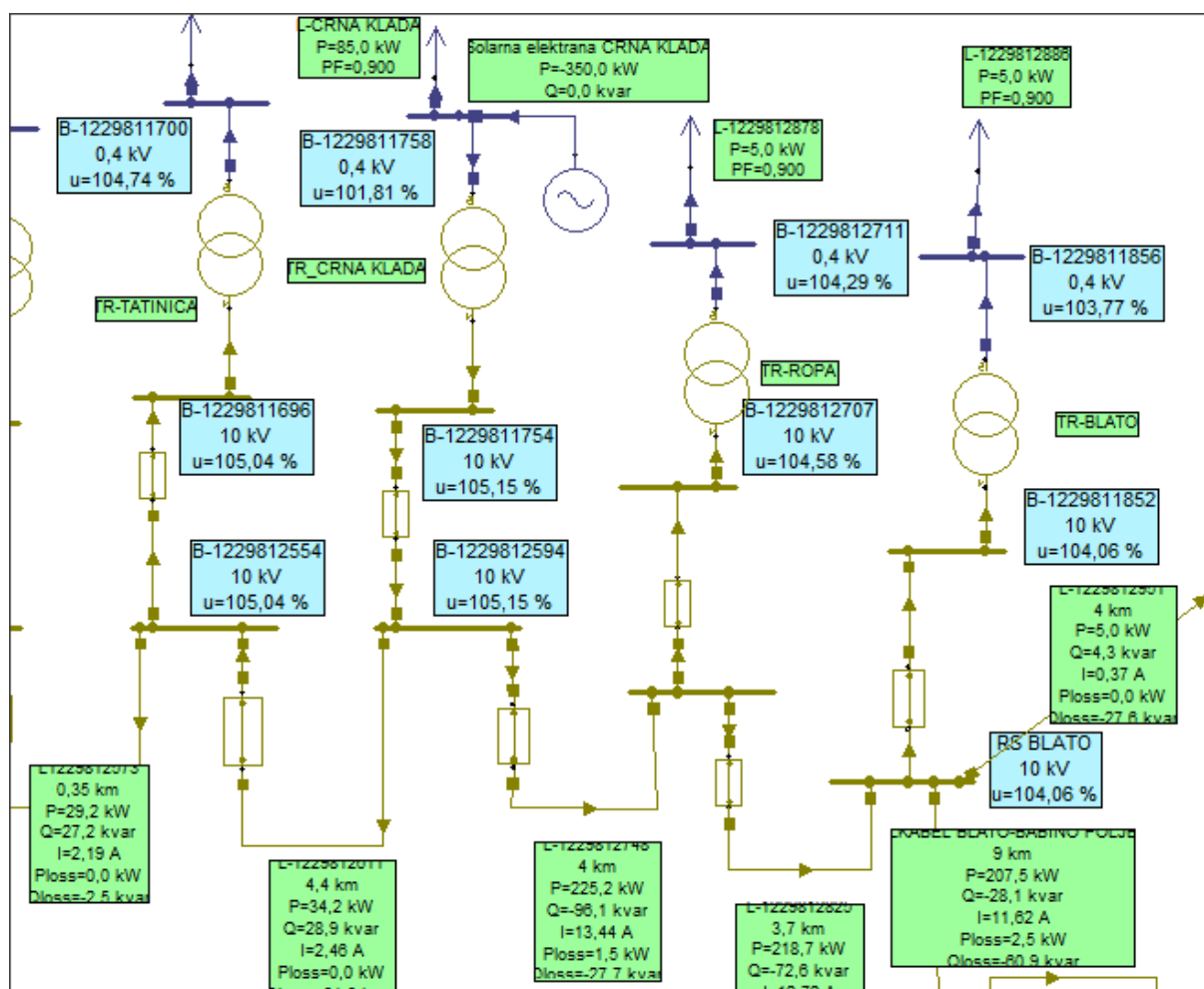
## 6.2. Rezultati proračuna u NEPLAN modelu

Radi usporedbe će se prikazati rezultati kod napajanja fotonaponskim elektranama i bez njih tj. kod napajanja uvoznom električnom energijom.

### 6.2.1. Napajanje fotonaponskim elektranama

#### 6.2.1.1. Proračun toka snage

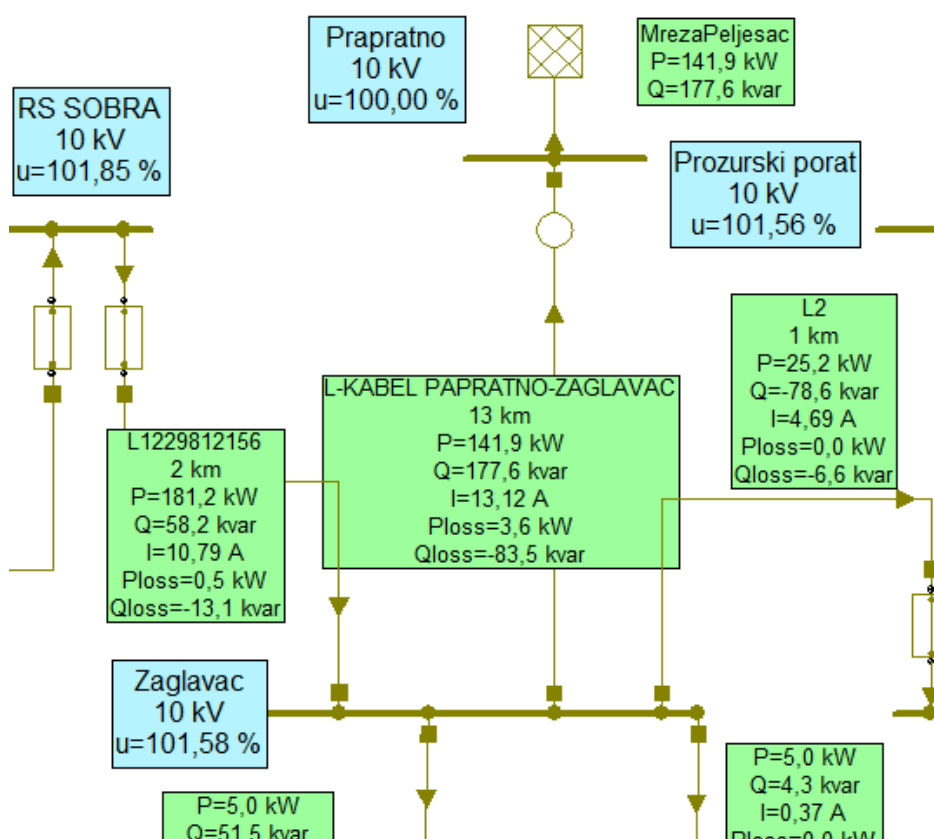
Slika 48. prikazuje dio elektroenergetskog sustava u koji je uključena fotonaponska elektrana. Iz proračuna tokova snage može se zaključiti da fotonaponska elektrana predaje tok u sustav te se dobivena snaga dalje grana po čvorovima mreže do trošila. U zelenim blokovima prikazani su parametri koji se postižu u vodovima, trošilima i elektranama.



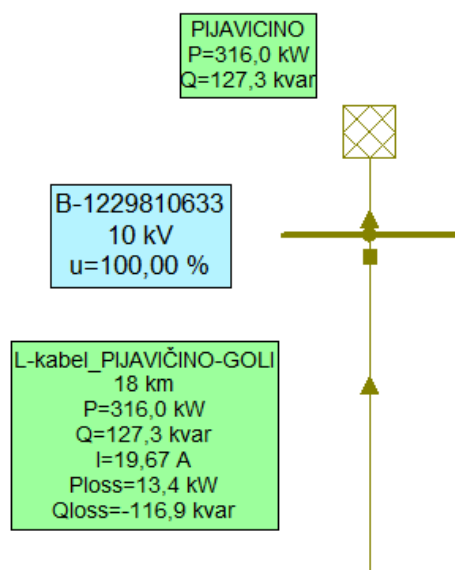
Slika 48. Napajanje fotonaponskom elektranom



Izvoz električne energije, tj. snage prikazan je na slikama 49. i 50. Na slici 49. tok snage ide prema poluotoku Pelješcu s istočne strane otoka te se tako dio proizvedene električne energije predaje direktno u EES. U ovom slučaju se od ukupno instalirane snage u iznosu od 870 kW u EES predaje 141,9 kW. Na zapadnoj strani otoka je taj iznos još veći te iznosi 316 kW (slika 50.), razlog je u tome što je većina fotonaponskih elektrana postavljena na zapadu. Na slikama 49. i 50. prikazane su i vrijednosti jalove snage te gubitaka radne i jalove snage. Gubici radne snage na kabelu koji spaja zapadnu stranu otoka Mljeta s kopnom iznose 13,4 kW, a gubici radne snage koji spajaju istočnu stranu otoka s kopnom iznose 3,6 kW. Gubici su na kabelu koji povezuje zapadni dio s kopnom veći 3,7 puta jer je taj kabel dulji od drugog kabela za 5 kilometara i ima veće opterećenje.



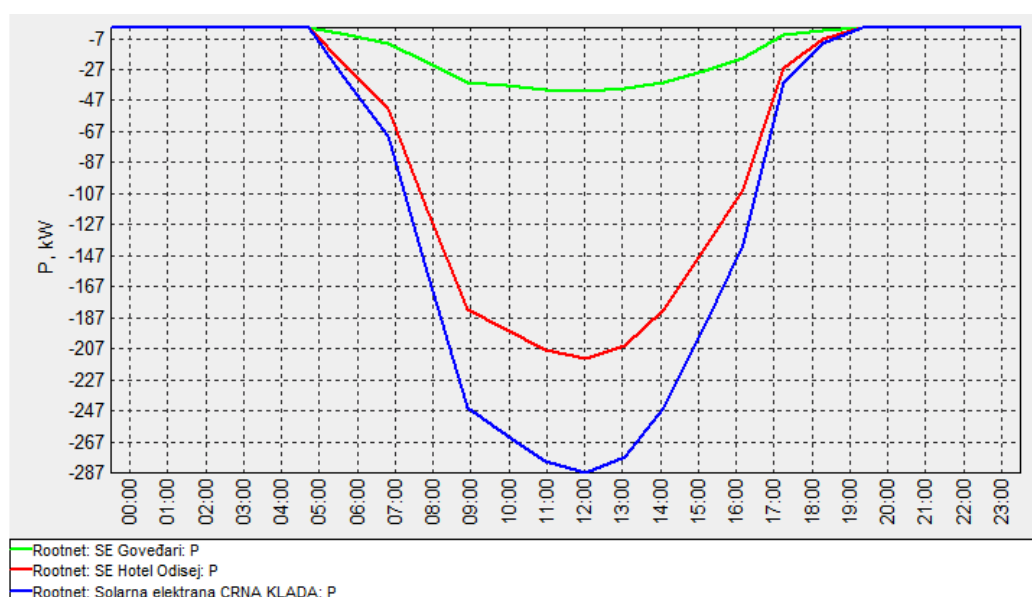
Slika 49. Tok snage prema Pelješcu s istoka



Slika 50. Tok snage prema Pelješcu sa zapada

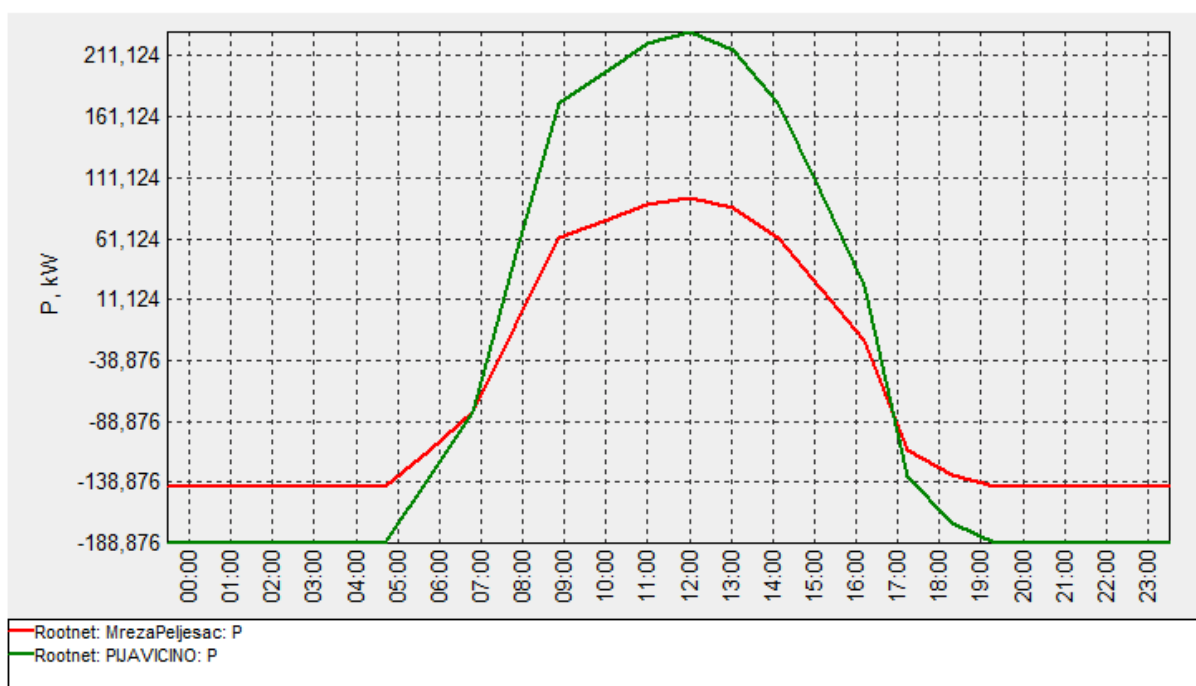
#### 6.2.1.2. Tok opterećenja s profilom opterećenja

Ovaj modul omogućuje prikaz profila opterećenja u 24 sata. Navedeni podaci prikazani su za prvi dan siječnja. Profil snaga fotonaponskih elektrana prikazan je na slici 51., snage su negativne što zapravo znači da se ta snaga predaje u sustav. Maksimalne vrijednosti postižu se u 12:00 sati. U periodu u kojem nema Sunca fotonaponske elektrane ne proizvode električnu energiju, tj. snaga im je jednaka nuli.



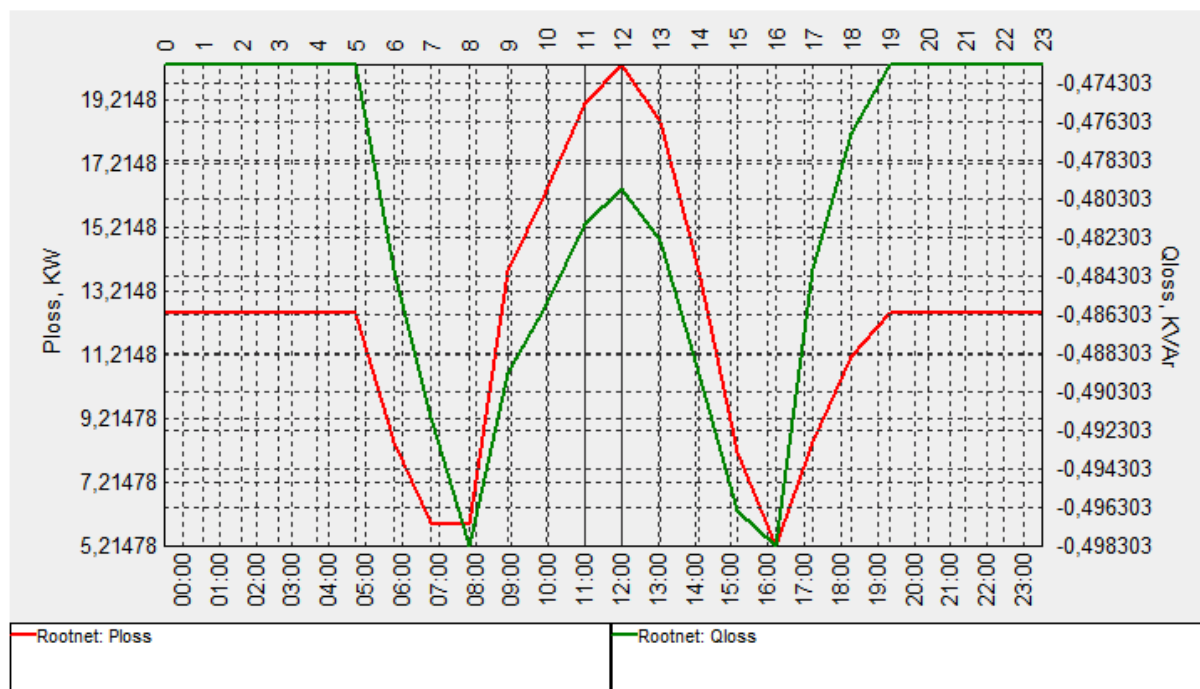
Slika 51. Snage fotonaponskih elektrana

Slika 52. prikazuje profil snage koja se predaje u EES na kopnu, tj koja opterećuje kabele koji su spojeni s kopnom. Zelenom bojom označeno je opterećenje kabela koji povezuje zapadni dio otoka s kopnom, a crvenom bojom opterećenje kabela koji povezuje istočni dio otoka s poluotokom Pelješcem. Kao što je prije naglašeno veće opterećenje ima kabel na zapadnoj strani otoka. Maksimalne vrijednosti postižu se isto u 12:00, a u periodu u kojem nema proizvodnje iz fotonaponskih elektrana, snage su negativne jer se u tom periodu snaga predaje u EES Mljeta. Maksimalna vrijednost opterećenja za kabel na zapadnoj strani je 220 kW, a kad nema proizvodnje iznosi 189 kW. Za kabel na istoku maksimum je 90 kW, a minimum 139 kW.



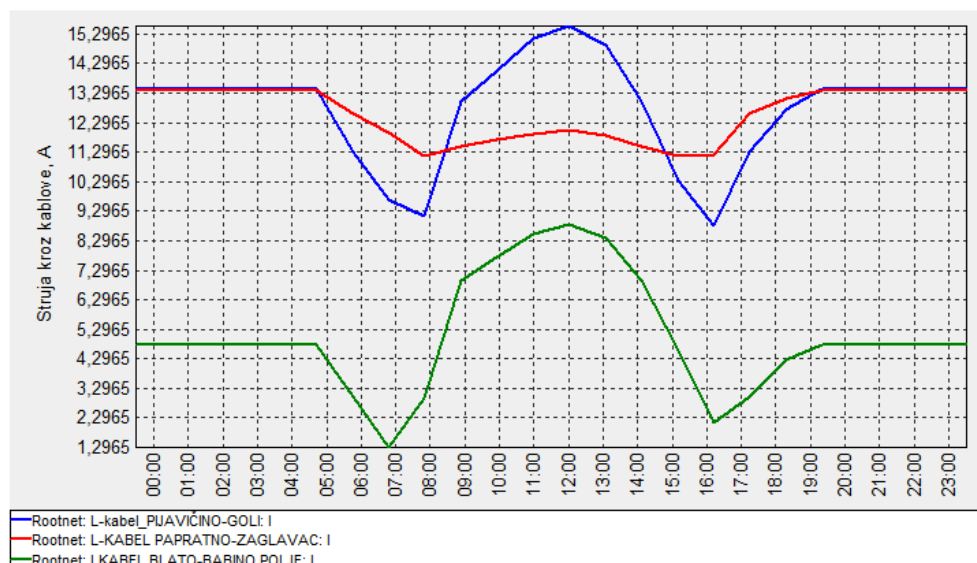
**Slika 52. Profil predane snage u EES kod proizvodnje iz FNE**

Slika 53. prikazuje gubitke radne i jalove snage koji se javljaju u mreži s instaliranim fotonaponskim elektranama. Maksimalni gubici javljaju se u 12:00 jer je u tom periodu opterećenje najveće. U periodu u kojem fotonaponske elektrane ne proizvode gubici su konstantni te za radnu snagu iznose oko 12 kW, a kada FNE počnu s proizvodnjom gubici se prvo smanjuju na otprilike 5,5 kW, ali u 8:00 počnu rasti do maksimalne vrijednosti od 20 kW.



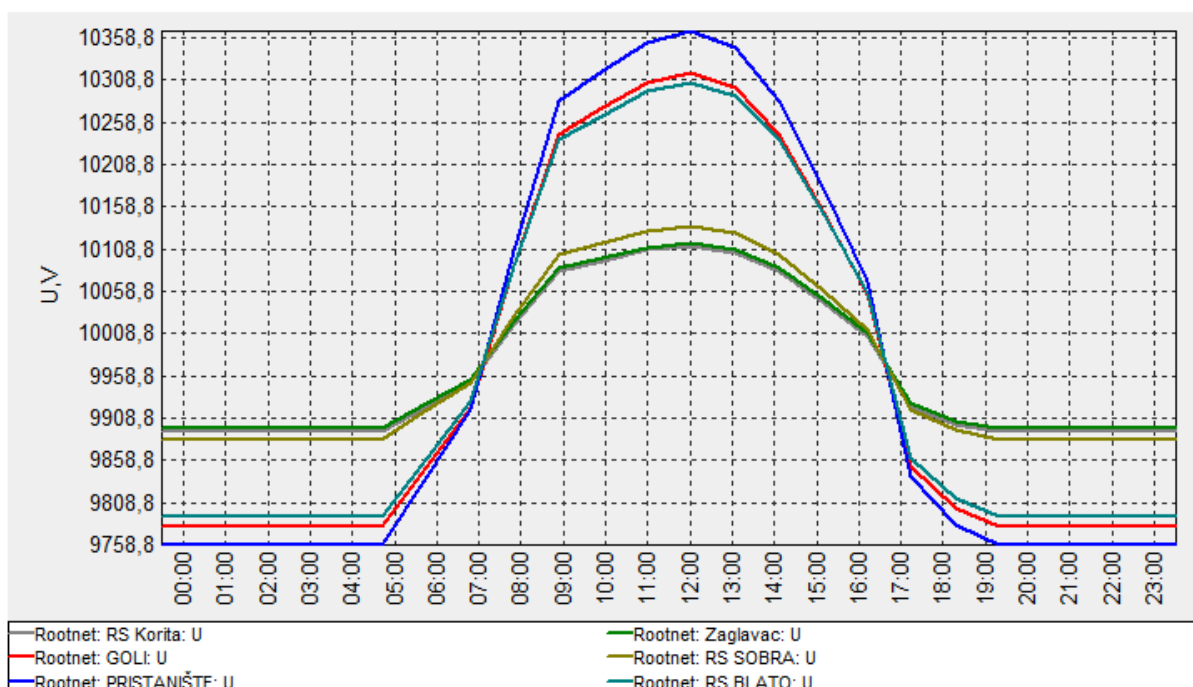
**Slika 53. Gubici kod proizvodnje iz FNE**

Struja koja teče kroz kabele prikazana je slikom 54. te se kao i na prethodnim slikama maksimalne vrijednosti postižu u 12:00, ali samo za kabele na zapadnoj strani jer se njima vodi snaga iz fotonaponskih elektrana. Profil struje kroz kabel koji spaja zapadnu stranu otoka s kopnom (plavo) i kabela koji spaja Blato s Babinim poljem (zeleno) je sličan. Kabelom na istočnoj strani teče manja struja nego kroz kabel na zapadnoj strani, a to je zato što ima manju duljinu, ali i zato što dobiva manje snage iz fotonaponskih elektrana, tj. manje je opterećen. Međutim u periodu u kojem FNE počinju s proizvodnjom (5:00-7:00), tj. u periodu u kojem im se proizvodnja počinje smanjivati (16:00-19:00) kroz kabel na istoku teče veća struja od struje koja teče kroz kabel na zapadu. Kada nema proizvodnje iz FNE struje kroz kabele su konstantne.



Slika 54. Struja kroz kabele kod proizvodnje iz FNE

Naponi na sabirnicama prikazani su na slici 55. i ovdje su maksimalne vrijednosti postignute u 12:00 te se na sabirnicama na zapadnoj strani postiže veći napon nego na sabirnicama na istočnoj strani.



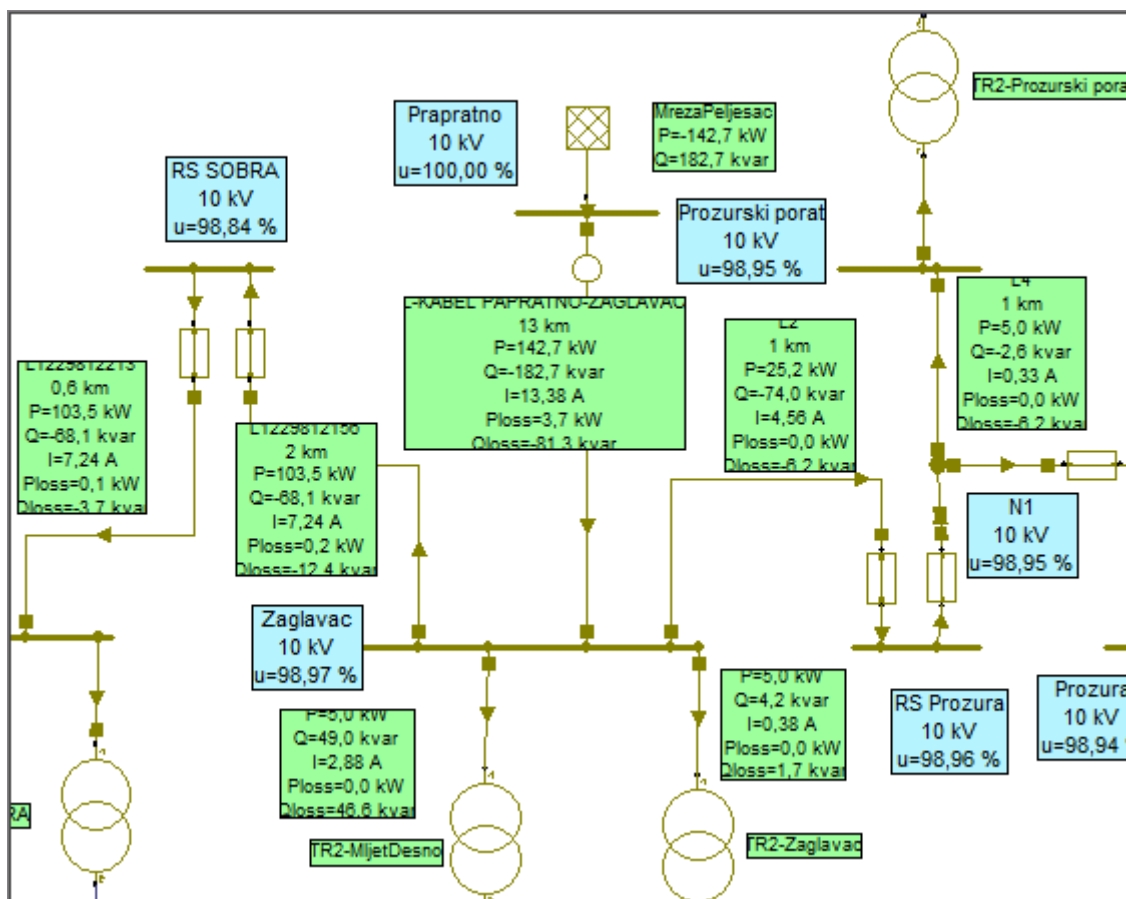
Slika 55. Napon na sabirnicama kod proizvodnje iz FNE

## 6.2.2. Napajanje kabelima

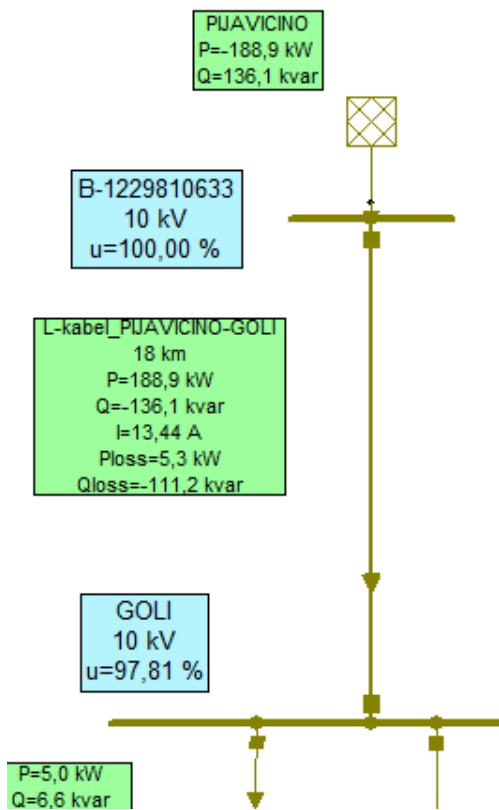
U ovom slučaju nema proizvodnje iz fotonaponskih elektrana.

### 6.2.2.1. Proračun toka snage

Slika 56. prikazuje tok snage od kabela na istočnoj strani otoka prema trošilima. Za razliku od slučaja kad imamo proizvodnju iz FNE u ovom slučaju nema predaje snage u EES prema Pelješcu, već se snaga predaje u EES otoka Mljeta. Predaje se snaga u iznosu od 142,7 kW na istočnoj strani, a na zapadnoj strani otoka predaje se 188,9 kW (slika 57.). Gubici radne snage su u ovom slučaju na istočnom kabelu 3,7 kW, a na zapadnom 5,3 kW. U odnosu na proračun toka snage kod proizvodnje iz FNE gubitak na kabelu koji spaja zapadni dio otoka s kopnom je manji bez FNE pošto je opterećenje kabela manje i manje snage protječe kroz njega.



Slika 56. Napajanje kabelom istočne strane otoka Mljeta

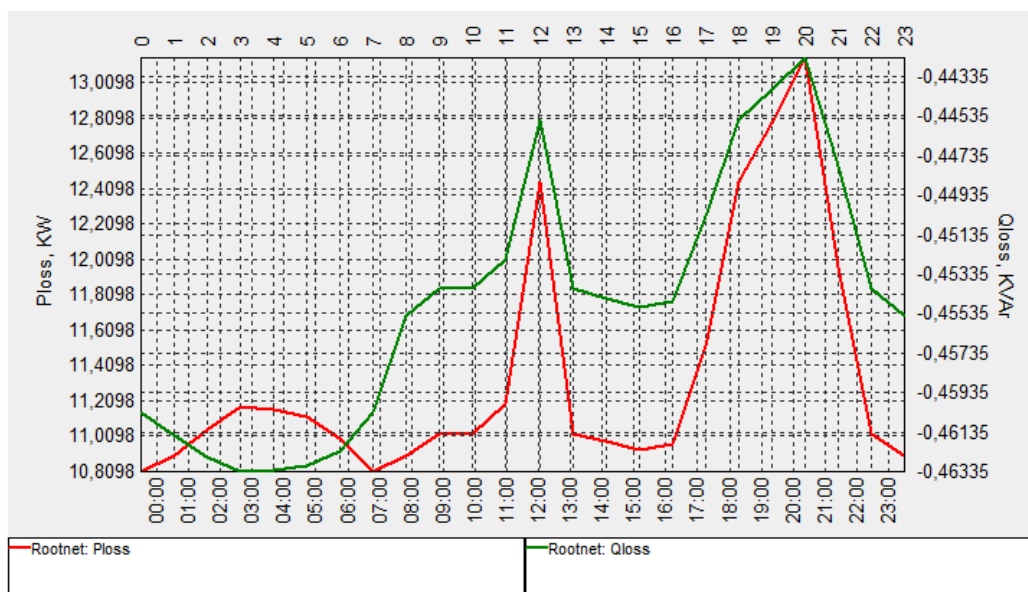


Slika 57. Napajanje kabelom zapadne strane otoka Mljeta

#### 6.2.2.2. Tok opterećenja s profilom opterećenja

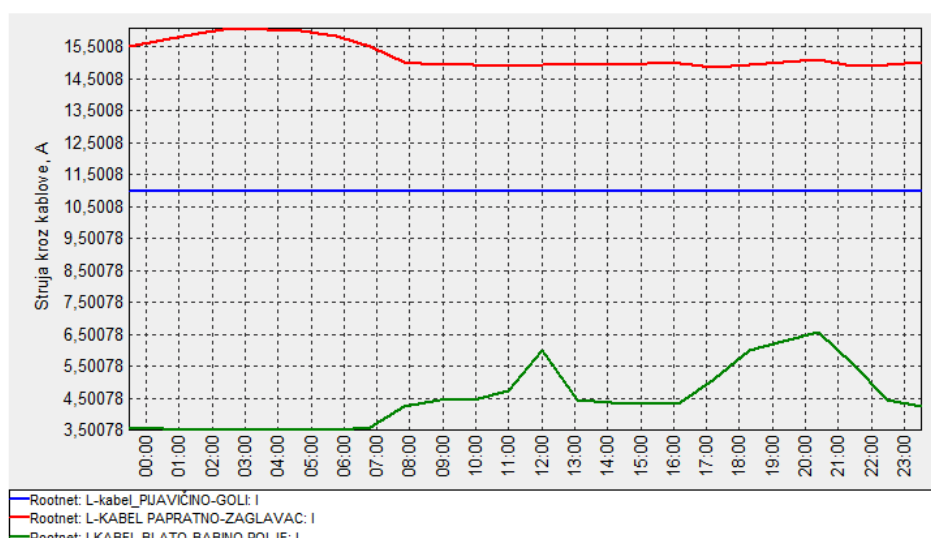
Na slici 58. prikazani su gubici radne i jalove snage kad nema proizvodnje iz fotonaponskih elektrana. Maksimalne vrijednosti postižu se u 20:00 sati te za radnu snagu iznose približno 13 kW. Iako su ti gubici nešto manji u odnosu na gubitke kod instaliranih FNE njihov profil je nepovoljniji jer se dva puta javljaju izražene amplitude gubitaka, a ako se uzme u obzir koliko se snage kod proizvodnje iz FNE preda u mrežu jasno je da su nešto veći gubici kod proizvodnje iz FNE zanemarivi. Međutim kad nema proizvodnje iz FNE gubici nisu zanemarivi i što je njihova vrijednost veća, veća je i cijena električne energije.





**Slika 58. Gubici bez FNE**

Slika 59. prikazuje struje koje teku kroz kabele bez fotonaponskih elektrana. Struja kroz kabel na zapadnoj strani je konstantna, a profil struje za kabel na istočnoj strani ima male amplitude. Kabel koji spaja Blato i Babino polje nalazi se na sredini otoka te se može zaključiti da kroz njega teče promjenjiva struja, ali je i puno manja od druga dva kabela. Najveća struja teče kroz kabel na istoku u iznosu od oko 15 A dok kroz kabel na zapadu teče nešto manja struja u iznosu od oko 11 A. Maksimalna struja kroz kabel na sredini otoka je 6,5 A.



**Slika 59. Struja kroz kabele bez FNE**



## **ZAKLJUČAK**

Na temelju rezultata dobivenih u ovom završnom radu pokazala se mogućnost integracije električne energije iz obnovljivih izvora u elektroenergetski sustav otoka Mljeta. Instaliranjem fotonaponskih elektrana odgovarajuće snage može se postići značajno smanjenje uvoza električne energije, što je prikazano na slici 30. gdje se u srpnju uvoz smanjuje za 37,5% (poglavlje 5.). Dio proizvedene električne energije iz fotonaponskih elektrana može se izvoziti pa se tako primjerice u jednom tjednu ožujka (slika 38.) izvozi 7,291 MWh te je ujedno i umanjen uvoz električne energije za 17,826 MWh pa je u promatranom tjednu potrebno uvoziti 62,9% od ukupne potrošnje dok se ostatak pokriva proizvodnjom iz FNE. Usporedbom slike 32. i slike 41. zaključuje se kako je izvoz električne energije u ožujku veći u odnosu na srpanj za 20,445 MWh odnosno 88%, a to je postignuto zbog znatno manje potrošnje električne energije u ožujku koja je u odnosu na srpanj manja za 184,093 MWh ili 52%. Ukupna godišnja proizvodnja iz FNE (slika 29.) iznosi 1060 MWh te se time pokriva 35,5% ukupne potrošnje, a prema proračunu koji je proveden u diplomskom radu [4] proizvodnjom iz FNE zadovoljava se 35% ukupne potrošnje (slika 16.) te se može zaključiti da su dobiveni rezultati praktički jednaki. Usporedbom opterećenja kod proizvodnje iz FNE dobivenog u EnergyPLAN modelu (slika 28.) i snaga FNE prikazanih u NEPLAN modelu (slika 51.) može se zaključiti da je profil opterećenja dobiven u EnergyPLAN modelu sličan profilu snaga iz NEPLAN modela. Maksimalna vrijednost opterećenja u EnergyPLAN modelu postiže se u 12:00 te iznosi 417 kW, a maksimalne vrijednosti snaga FNE u NEPLAN modelu postižu se u 13:00 te za FNE Crna Klada ta snaga iznosi 287 kW.

Na slici 46. (poglavlje 6.1.) u NEPLAN modelu pokazano je da se instaliranjem fotonaponske elektrane snage 260 kW na krovu hotela Odisej pokriva potrošnja hotela te se dio proizvedene električne energije prenosi u distribucijsku mrežu. Na slikama 49. i 50. (poglavlje 6.2.1.1.) vidimo da se od ukupno instalirane snage od 870 kW u elektroenergetski sustav na kopnu prenosi 457,9 kW, što znači više od polovice instalirane snage. Pošto je otok Mljet povezan s energetske sustavom na kopnu izvoz električne energije je moguć te bi se mogli postići značajni prihodi, što bi pokazala financijska analiza ako bi se provela.

NEPLAN model za energetske planiranje je zanimljiv programski alat koji služi za proračun tokova snage po čvorovima distribucijske mreže te omogućuje integraciju električne energije iz obnovljivih izvora u elektroenergetski sustav pa je zbog toga često korišten kod

energetskog planiranja. Pokazuje realno stanje sustava i tokove snage koji se javljaju u pojedinim dijelovima mreže te daje detaljne analize električnih elemenata i njihovih parametara. Kako je prije naglašeno u ovom završnom radu podaci potrebni za proračun u NEPLAN modelu su pretpostavljeni jer su bili dostupni samo podaci o snazi trafostanica te naponi distribucijske mreže i neki podaci o vodovima. Za validaciju modela trebalo bi imati sve podatke s terena te provesti mjerenja i očitavanja struje, napona i snage s pojedinih dijelova mreže.

Izgradnjom fotonaponskih elektrana na otoku Mljetu postigle bi se brojne prednosti. S obzirom na to da otok Mljet obiluje prirodnim bogatstvima te se na njemu nalazi nacionalni park bitno je da se planira energetske sustav koji neće narušiti njegov okoliš. Fotonaponske elektrane nemaju štetan utjecaj na okoliš, nemaju štetnih emisija ugljikovog dioksida i koriste neiscrpan izvor energije. Predviđeno je da se fotonaponske elektrane na Mljetu izgrade na krovovima kuća, na krovu hotela Odisej i na nadstrešnici parkirališta u naselju Crna Klada te se time neće zauzeti dodatna površina na otoku i nije potrebna priprema terena za postavljanje PV panela. Iz navedenog je jasno da otok Mljet ima sve predispozicije da postane „zeleni otok“ te da svoju potrošnju pokriva vlastitom proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora.

## LITERATURA

- [1] NEPLAN Electricity, [www.neplan.ch](http://www.neplan.ch)
- [2] Tehnička dokumentacija,  
[www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/PCPUTP\\_predavanje.pdf](http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/PCPUTP_predavanje.pdf)
- [3] Marušić A., Havelka J., Električne sheme, 2014.
- [4] Krajačić G., Energetsko planiranje otoka Mljet uz uvjet maksimizacije korištenja obnovljivih izvora, diplomski rad, Zagreb, 2004.
- [5] Krajačić G., Gašparović G., Matak N., Studija mreže otoka Mljet – OIE, Zagreb, 2015.
- [6] Krajačić G, Matak N., Pilato A. M., Čuljat Z., Market Đ., Dabelić D., Sršen M., Hazdovac F., Pečar O., Vojvoda D., Akcijski plan učinkovitog gospodarenja energijom Općine Mljet (SEAP), Dubrovnik, 2014.
- [7] EnergyPLAN, [www.energyplan.eu](http://www.energyplan.eu)